

DEUTSCHLAND

11 DE 31 27 164 A 1

DEUTSCHES
PATENTAMT

- 21 Aktenzeichen:
22 Anmeldetag:
43 Offenlegungstag:

P 31 27 164.2
9. 7. 81
29. 4. 82

G 01 D 5/22
G 01 N 9/34
G 01 V 1/18

Behördeneigentum

- 24 Unionspriorität: 25 26 31

10.07.80 JP P65-93275

- 17 Erfinder:

Oshiro, Taro, Fuchu, Tokyo, JP

- 71 Anmelder:

Oshiro, Taro, Fuchu, Tokyo, JP; Takeda, Hidekazu, Higashi
Murayama, Tokyo, JP; Ohashi, Takeo, Tokyo, JP

- 74 Vertreter:

Jung, E., Dipl.-Chem. Dr.phil.; Schirdewahn, J., Dipl.-Phys.
Dr.rer.nat.; Schmitt-Nilson, G., Dipl. Ing. Dr.-Ing.; Hagen,
G., Dr.phil.; Hirsch, P., Dipl.-Ing., Pat.-Anw., 8000 München

25 Differentialtransformatoren

Differentialtransformator mit einer über die gesamte Länge einer Spule gewickelten Primärwicklung und zwei direkt über die Primärwicklung gewickelten Sekundärwicklungen, wobei jeweils vom mittleren Bereich der Primärwicklung ausgehend, sich eine Sekundärwicklung nach rechts und die andere Sekundärwicklung nach links erstreckt und die Primärwicklung für eine Erragung bei einer Frequenz zwischen 50 kHz und 2000 kHz ausgelegt ist. Ein Kern oder ein Gehäuse des Differentialtransformators kann mit einem Gegenstand, dessen Bewegungen zu messen sind, beweglich sein. Dabei kann der Kern bzw. das Gehäuse aus einem leitenden Material niedriger Permeabilität bestehen und eine spezifische, magnetische Suszeptibilität zwischen etwa 10^{-3} und 10^{-4} aufweisen.

(31 27 164)

DE 31 27 164 A 1

DE 31 27 164 A 1

3127164

ELISABETH JUNG DR. PHIL., DIPL.-CHEM.
JÜRGEN SCHIRDEWAHN DR. RER. NAT., DIPL.-PHYS.
GERHARD SCHMITT-NILSON DR.-ING.
GERHARD B. HAGEN DR. PHIL.
PETER HIRSCH DIPL.-ING.

PATENTANWÄLTE
EUROPEAN PATENT ATTORNEYS

8000 MÜNCHEN 40,
P. O. BOX 40 14 69
CLEMENSSTRASSE 30
TELEFON: (089) 34 50 67
TELEGRAMM/CABLE: INVENT MÜNCHEN
TELEX: 5-20 686

u.Z.: Q 724 M3 (Hi/Fi/we)

9. Juli 1981

Taro OSHIRO,
Hidekazu TAKEDA,
Takeo OHASHI,
Tokio, Japan

" Differentialtransformatoren "

Beanspruchte Priorität:

10. Juli 1980, Japan, Nr. Sho 55-93275

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Differentialtransformator, gekennzeichnet durch eine Primärwicklung (12), die in einer oder zwei Schichten um eine Spule (11) gewickelt ist und die gesamte Länge der Spule (11) bedeckt, und durch zwei Sekundärwicklungen (14, 16), die in einer vorgeschriebenen Anzahl von Windungen direkt über die Primärwicklung (12) gewickelt sind, wobei jeweils vom mittleren Bereich der Primärwicklung (12) ausgehend sich eine Sekundärwicklung nach rechts und die andere Sekundärwicklung nach links erstreckt, wobei die Primärwicklung (12) für eine Erregung bei einer Frequenz zwischen 50 kHz und 2000 kHz ausgelegt ist.

2. Differentialtransformator nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Anzahl der Windungen der Sekundärwicklungen (14, 16) 0,5- bis 5mal, bevorzugterweise 0,5 bis 2mal so groß ist wie die der Primärwicklung (12).

3. Vibrometer des Lageveränderungs-Typs, bei dem ein Differentialtransformator nach Anspruch 1 oder 2 verwendet ist, gekennzeichnet durch einen röhrenförmigen Körper (31), einen von einer Federeinrichtung (35, 36) getragenen Vibrationskörper (33), der innerhalb des röhrenförmigen Körpers (31) in axialer Richtung desselben bewegbar ist und dessen Vibration mittels eines Fluids (32) dämpfbar ist, eine in einer oder zwei Schichten um den äußeren Umfang des röhrenförmigen Körpers (31) gewickelte Primärwicklung (37), und durch zwei Sekundärwicklungen (39, 40), die jeweils in einer vorgeschriebenen Anzahl von Windungen direkt über die Primärwicklung (37) gewickelt sind, wobei jeweils vom mittleren Bereich der Primärwicklung (37) ausgehend sich eine Sekundärwicklung nach rechts und die andere Sekundärwicklung nach links erstreckt.

4. Differentialtransformator mit einem sich mit einem zu erfassenden Gegenstand bewegenden Kern oder Gehäuse, einer Primärwicklung, die entlang der Bewegungsbahn des Kerns oder des Gehäuses angeordnet ist und mit einem Wechselstrom erregbar ist, und mit Sekundärwicklungen, die eine Spannungsdifferenz proportional zur Lageveränderung des Kerns oder des Gehäuses erzeugen, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern oder das Gehäuse aus einem leitenden Metallmaterial niedriger Permeabilität mit einer spezifischen magnetischen Suszeptibilität zwischen ca. 10^{-3} und ca. 10^{-6} gebildet ist, und daß ein Erregerstrom hoher Frequenz zwischen 50 kHz und 2 MHz auf die Primärwicklung aufprägbar ist.

5. Differentialtransformator nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß das den Kern oder das Gehäuse bildende leitende Metallmaterial niedriger Permeabilität Silber, Kupfer, Aluminium oder eine solche Metalle enthaltende Legierung ist.

6. Differentialtransformator nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Primärwicklung (16) in einer oder zwei Schichten auf die Böden zweier in einer Spule (11) vorgesehener Nuten (13, 14) gewickelt ist, und daß die Sekundärwicklungen (18, 19) innerhalb jeder der beiden Nuten (13, 14) direkt über die Primärwicklung (16) gewickelt sind.

7. Differentialtransformator nach einem der Ansprüche 4, 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern (38) scheibenförmig ausgebildet ist, daß die Primärwicklung in zwei Teile (31, 32) unterteilt ist, die auf zwei auf beiden Seiten des scheibenförmigen Kerns (38) angeordnete Spulen (29, 30) gewickelt und in Reihe geschaltet sind, und daß die Sekundärwicklungen (34, 36) direkt über die geteilten Teile (31, 32) der Primärwicklung gewickelt und differenzmäßig verbunden sind.

8. Differentialtransformator nach einem der Ansprüche 4, 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern in zwei Kerne (48, 49) geteilt ist, und daß die beiden Kerne (48, 49) auf beiden Seiten der Spule (40) angeordnet sind.

9. Differentialtransformator nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß einer (51) der Kerne in enger Berührung an der Spule (40) befestigt ist, während der andere (52) der Kerne durch einen Teil einer Struktur, einer Maschine oder einer sich bewegenden flachen Platte ersetzt ist, und daß Änderungen in der Entfernung zwischen der Spule (40) und dem Teil der Struktur, der Maschine oder der sich bewegenden flachen Platte in einer berührungsfreien Weise festgestellt werden.

10. Differentialtransformator mit einem Kern, der sich zusammen mit einem zu erfassenden Gegenstand bewegt, einer Primärwicklung, die entlang der Bewegungsbahn des Kerns

angeordnet ist und mit einem Wechselstrom erregbar ist, und mit Sekundärwicklungen, die eine Spannungsdifferenz proportional zur Lageveränderung des Kerns erzeugen, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern (12) aus einem leitenden Metallmaterial niedriger Permeabilität mit einer spezifischen magnetischen Suszeptibilität zwischen ca. 10^{-3} und ca. 10^{-6} besteht und ringförmig ausgebildet ist, daß ein Stab oder ein Rohr aus einem ferromagnetischen Material mit einer spezifischen magnetischen Suszeptibilität zwischen ca. 10^3 und ca. 10^6 als Hilfskern (13) verwendet ist und durch den ringförmigen Hohlraum des ringförmigen Kerns (12) hindurchragt, und daß ein Erregerstrom hoher Frequenz zwischen ca. 50 kHz und ca. 2 MHz auf die Primärwicklung (6) aufprägbare ist.

11. Differentialtransformator nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der durch den ringförmigen Hohlraum des ringförmigen Kerns (12) hindurchragende Hilfskern (13) an dem Kern (12) befestigt ist und als Stützstange für den Kern (12) dient, und daß der Kern (12) und der Hilfskern (13) miteinander bewegbar sind.

12. Differentialtransformator nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß der Kern (15) auf dem Hilfskern (17) verschiebbar ist.

13. Differentialtransformator nach einem der Ansprüche 10, 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Sekundärwicklungen (8, 9) jeweils direkt über die Primärwicklung (6) gewickelt sind.

" Differentialtransformatoren "

Die Erfindung bezieht sich auf Verbesserungen bei Differentialdetektoren, die im allgemeinen unter der Bezeichnung Differentialtransformatoren bekannt sind, und insbesondere auf Differentialtransformatoren einer neuen Art, bei denen Sekundärwicklungen direkt über eine Primärwicklung gewickelt sind und ein Erregerstrom hoher Frequenz auf die Primärwicklung aufprägbare ist. Die Erfindung bezieht sich auch auf ein Vibrometer des Lageveränderungs-Typs, bei dem ein erfindungsgemäßer Differentialtransformator verwendet wird.

Die allgemein verwendeten herkömmlichen Differentialtransformatoren umfassen eine zylindrische Spule, um deren mittleren Bereich eine Primärwicklung gewickelt ist und an beiden Seiten der Primärwicklung jeweils eine Sekundärwicklung gewickelt ist, so daß die Sekundärwicklungen durch die Primärwicklung voneinander getrennt sind. Die erste Wicklung ist von einem einige Volt hohen Wechselstrom mit einer niedrigen Frequenz, die 10 kHz nicht übersteigt, zu erregen. Die Primärwicklung ist durch einen feinen Draht gebildet, dessen Durchmesser normalerweise 0,3 mm oder weniger beträgt. Der durch die Primärwicklung fließende Strom muß unter einer Sicherheitsschwelle gehalten werden, die z.B. 10 mA bis 20 mA für einen Draht von 0,1 mm Durchmesser beträgt. Demgemäß sind für die Primärwicklung eine große Anzahl von Windungen erforderlich, d.h., einige 1000 Windungen sogar für einen Differentialtransformator, der für einen Meßbereich von ± 10 mm ausgelegt ist, sowie ein hoher Gleichstrom-Widerstand erforderlich, um somit eine

Impedanz von mindestens ca. 100 Ohm zu schaffen, die sich aus dem hohen Gleichstrom-Widerstand und dem induktiven Widerstand, d.h. dem Blindwiderstand zusammensetzt.

Um weiterhin eine hohe Ausgangsspannung zu erhalten, ist es notwendig, große Spannungen in den Sekundärwicklungen zu induzieren. Dies hat es erforderlich gemacht, daß in den meisten Fällen jede Sekundärwicklung 2- bis 5-mal so viele Windungen wie die Primärwicklung aufweist. Dementsprechend ist die Anzahl der Windungen der Sekundärwicklungen sehr groß. Dies führte dazu, daß der Differentialtransformator große Abmessungen aufweist, was wiederum eine große Menge von Material sowie lange Fertigungszeiten erforderlich macht.

In den Zeichnungen ist ein allgemein verwendeter typischer Differentialtransformator im Schnitt in Fig. 1 dargestellt. Eine Primärwicklung 2 ist um den mittleren Bereich einer Spule 1, die aus einem nicht-magnetischen Material hergestellt ist, gewickelt und mit Leitungsdrähten 3 versehen. Sekundärwicklungen 4 und 6, die mit Leitungsdrähten 5 bzw. 7 versehen sind, sind um die jeweiligen äußeren Bereiche der Spule 1 gewickelt und somit auf beiden Seiten der Primärwicklung 2 angeordnet. Die Leitungsdrähte 5 und 7 der Wicklungen 4 und 6 sind wie in Fig. 2 dargestellt differenzmäßig miteinander verbunden. Es ist ein Eisenkern 8 vorgesehen, der von einem nicht-magnetischen Stabelement 9 getragen ist. Wie allgemein bekannt ist, wird bei Erregung der Primärwicklung 2 durch Verbinden der Leitungsdrähte 3 mit einem Wechselstrom-Oszillator eine der Lageveränderung des Eisenkerns 8 proportionale Spannung zwischen den Leitungsdrähten 5 und 7 erzeugt. Differentialtransformatoren werden wegen dieser Funktion der Umwandlung der mechanischen Lageveränderung des Eisenkerns 8 in eine Spannung häufig verwendet.

Die herkömmlichen Differentialtransformatoren weisen jedoch große Außendurchmesser aufgrund der hohen Anzahl von Windungen ihrer Wicklungen auf. Ihre Gehäuse weisen normalerweise einen Außendurchmesser von 20 bis 30 mm auf, während ihre sich in den Spulen bewegenden Kerne einen Durchmesser von 5 bis 8 mm aufweisen. Aus diesem Grund sind sie für die Messung der Lageveränderung bei so großen Maschinen, wie Werkzeugmaschinen, Fertigungsmaschinen, Fahrzeugen, etc., geeignet, jedoch nicht für die Messung der Lageveränderung bei solch kleinen leichten Geräten wie den Bourdonschen Röhren von Manometer - Waagen, etc. Außerdem würden vor einiger Zeit kleine Differentialtransformatoren entwickelt, die mit einer Frequenz von nicht mehr als 20 kHz betrieben werden, deren Gehäuse und Eisenkerne Abmessungen von ca. 5 mm bzw. 1,6 mm aufweisen. Differentialtransformatoren dieser Art lassen sich jedoch nur für bestimmte Zwecke verwenden.

Ein erster Gesichtspunkt der Erfindung besteht darin, ein Differentialtransformator zu schaffen, der die vorgenannten Nachteile der herkömmlichen Differentialtransformatoren ausschaltet und bei dem eine Primärwicklung mit einer relativen geringen Anzahl von Windungen von einem Hochfrequenz-Wechselstrom zwischen 50 kHz und 2 MHz erregt wird und bei dem außerdem Sekundärwicklungen direkt über die Primärwicklung gewickelt sind, um somit geeignete Spannungen in den Sekundärwicklungen zu induzieren.

Genauer gesagt, ist der induktive Blindwiderstand einer Spule im wesentlichen der Frequenz eines Erregerstroms proportional. Somit wird durch die Erregung einer Primärwicklung, die aus einer kleinen Anzahl von Windungen besteht, die in einer oder zwei Schichten über die gesamte Länge einer Spule gewickelt sind, mit einem Strom, der im Vergleich zum herkömmlichen Differentialtransformator eine viel höhere Frequenz aufweist, die zwischen 50 kHz und 2 MHz liegt, die Impedanz der Primär-

wicklung angehoben (im allgemeinen auf einen Wert von mindestens 100 Ohm). Eine geeignete Spannung, die an die Primärwicklung mit einer solchen hohen Frequenz innerhalb der Sicherheitsstromgrenze angelegt wird, induziert eine hohe Spannung in jeder der direkt auf die Primärwicklung aufgewickelten Sekundärwicklungen.

V Versuchsergebnisse haben gezeigt, daß die Anzahl der Sekundärwicklungs-Windungen nicht mehr als 0,5 bis 5mal, bevorzugterweise 0,5 bis 2mal, so groß wie die der Primärwicklung sein muß. Wie allgemein bekannt ist, hängt die durch die Primärwicklung in der Sekundärwicklung induzierte Spannung von dem Verhältnis zwischen der Windungsanzahl der Wicklungen ab. Wird die Windungsanzahl der Primärwicklung reduziert, läßt sich somit eine ausreichend hohe Spannung in jeder Sekundärwicklung beibehalten, selbst wenn die Windungsanzahl jeder Sekundärwicklung ebenfalls reduziert ist. In Anbetracht dieser Tatsache schafft die Erfindung einen kleinen Differentialtransformator durch Verringern der Windungsanzahl der Primärwicklung, wodurch auch die der Sekundärwicklungen verringert wird, und somit wird der gesamte Transformator kleiner.

Im allgemeinen wird bei Vergrößern der Länge der Spule eines Differentialtransformators der Meßbereich oder der Bereich (im allgemeinen als Hub bezeichnet) vergrößert, in dem die Lageveränderung des Eisenkerns geeignet proportional zur sich ergebenden Spannung gehalten wird. Eine Vergrößerung der Länge der Spule führt jedoch zu einer Erhöhung der Windungsanzahl der Primärwicklung, die in einer oder zwei Schichten über die gesamte Länge der Spule gewickelt ist, sowie zu einer Erhöhung sowohl des Gleichstrom-Widerstandes als auch des induktiven Blindwiderstandes. Ein Ergebnis davon ist, daß der gewünschte Erregerstrom kaum erzielbar ist, es sei denn, eine hohe Spannung wird angelegt. Um den Wert der Impedanz sowohl für die lange Spule als auch für eine kurze Spule auf dem

gleichen Niveau zu halten, muß der induktive Widerstand oder Blindwiderstand durch Verringerung der Erregerfrequenz in dem Maße reduziert werden, in dem die Länge der Spule und die Anzahl der Primärwicklungswindungen zunehmen.

Mit anderen Worten heißt das, daß es geeignet ist, eine niedrigere Frequenz für einen Differentialtransformator mit einem längeren Meßbereich zu verwenden. Umgekehrt ist die Verwendung einer höheren Frequenz für einen Differentialtransformator mit einem kurzen Meßbereich und für Wicklungen besonders kleinen Durchmessers geeignet.

Gemäß den Versuchsergebnissen ist die Verwendung einer Frequenz von ca. 100 kHz für einen erfindungsgemäß konzipierten Differentialtransformator für einen Meßbereich von ± 20 bis ± 30 mm geeignet, wobei ein derartiger Differentialtransformator eine Spule mit 5 mm Außendurchmesser, eine in zwei Schichten über eine Windungsbreite von 8 cm gewickelte Primärwicklung sowie einen 4 bis 6 cm langen Eisenkern aufweist. In diesem Fall beträgt der Gleichstrom-Widerstand der Primärwicklung nur 30 bis 35 Ohm, was weniger als beim herkömmlichen Differentialtransformator ist. Der induktive Blindwiderstand der Primärwicklung erreicht jedoch ca. 500 Ohm. Außerdem läßt sich bei Verwendung einer höheren Frequenz bei einem Differentialtransformator mit einem kurzen Meßbereich leicht ein Wert erreichen, der 100 Ohm übersteigt, und das Erregen der Primärwicklung mit einer Spannung von einigen Volt ergibt niemals einen Strom, der die Sicherheitsgrenze übersteigt.

Im allgemeinen nimmt die Induktivität proportional zum Quadrat des Spulendurchmessers und der Windungsanzahl zu oder ab. Somit läßt sich die Induktivität dadurch verringern, daß eine Spule mit kleinerem Durchmesser verwendet wird. Um den induktiven Blindwiderstand bei einer Spule mit kleinerem Durch-

messer auf einem geeigneten Wert zu halten, wird somit eine hohe Erregerfrequenz verwendet. Wenn die Spule zum Beispiel einen Durchmesser von 4 mm aufweist und der Meßbereich ± 10 bis ± 20 mm beträgt, liegt eine geeignete Frequenz zwischen ca. 300 und ca. 500 kHz.

Ist die Anzahl der Windungen geringer, d.h. der Meßbereich kürzer, während der Durchmesser der Spule unverändert ist, beträgt eine geeignete Erregerfrequenz ca. 800 kHz, selbst wenn die Spule den genannten Durchmesser von 4 mm aufweist und der Meßbereich ± 2 mm beträgt.

Wird eine Spule mit kleinerem Durchmesser verwendet, z.B. 2,2 mm, liegt eine geeignete Erregerfrequenz zwischen 800 und 1000 kHz, selbst wenn der Meßbereich ± 5 mm beträgt.

Ergebnisse von verschiedenen Versuchen, die zur Auffindung praktischer Grenzen in bezug auf die Anzahl der Wicklungswindungen, des Wicklungsdurchmessers und des Meßbereichs durchgeführt wurden, zeigen, daß das Anlegen eines Wechselstroms hoher Frequenz von mehr als 2 MHz an eine Primärwicklung einen Skin- bzw. Oberflächenstrom verursacht, der aufgrund der Kapazität nebeneinanderliegender Drähte erzeugt wird, und dies reduziert rasch den zur Erregung der Wicklung nutzbaren Strom. Dies macht es schwierig, eine hohe Spannung in jeder Sekundärwicklung zu induzieren. In Anbetracht dieser Tatsache müssen die erfindungsgemäßen Differentialtransformatoren bei einer Frequenz von nicht über ca. 2 MHz betrieben werden.

Was die untere Grenze der verwendbaren Frequenzwerte angeht, so kann die bei Verwendung von im Handel erhältlichen Eisenkernen der herkömmlichen Differentialtransformatoren/^{ermittelte Grenze} für die erfindungsgemäßen Differentialtransformatoren als Standard betrachtet werden. Der Grund dafür ist folgender: Die her-

kömmlichen im Handel erhältlichen Eisenkerne weisen einen Durchmesser von 5 bis 8 mm auf und haben den Vorteil mechanischer Festigkeit. Die Verwendung dieser Eisenkerne bei den erfindungsgemäßen Differentialtransformatoren führt zu dem definitiven Vorteil, daß diese im Vergleich zu herkömmlichen Typen einen kleineren Außendurchmesser aufweisen, während ihre ausgezeichnete mechanische Festigkeit beibehalten wird. Liegt der Kerndurchmesser zwischen 5 und 8 mm, so beträgt der Außendurchmesser der Spule ca. 10 mm. Bei einer Spule von 9 mm Durchmesser mit einem Meßbereich von ± 25 mm zum Beispiel liegt die zu verwendende Frequenz zwischen 50 und 60 kHz, was mehr als 5mal größer ist als die bei herkömmlichen Differentialtransformatoren verwendete Frequenz, während der Außendurchmesser des Transformators etwa die Hälfte des Durchmessers der herkömmlichen Transformatoren beträgt. Aus diesem Grund wird die untere Grenze der Frequenz auf 50 kHz festgesetzt.

Der Außendurchmesser des erfindungsgemäßen Differentialtransformators läßt sich aufgrund der geringen Anzahl von Windungen der Primär- und Sekundärwicklungen sehr klein halten. In der Zwischenzeit hat der jüngste Fortschritt in der Elektronik kleine stabile Verstärker zu geringen Kosten verfügbar gemacht. Damit hat man das Bedürfnis ausgeräumt, die Ausgangsspannung von Meßgeräten zu erhöhen. Aus diesem Grund lassen sich die Erregerspannung für die Primärwicklung sowie die Induktanz derselben verringern. Dies wiederum ermöglicht eine weitere Reduzierung des Außendurchmessers und der Anzahl der Wicklungswindungen.

Ein weiterer Gesichtspunkt der Erfindung besteht darin, ein Vibrometer des Lageveränderungs-Typs zu schaffen, bei dem ein erfindungsgemäßer Differentialtransformator wie bereits beschrieben verwendet wird.

Im allgemeinen dient ein Vibrometer des Lageveränderungs-Typs, das einen Differentialtransformator verwendet, zur Feststellung eines Vibrationszustandes eines Körpers mit einer bestimmten, gegebenen natürlichen Schwingungsfrequenz oder zur Feststellung der Masse eines Vibrationskörpers, der von einer Federanordnung getragen ist, wobei ein geeignetes Dämpfungsmaß durch ein Fluid geschaffen ist, durch Messen der Lageveränderung des Körpers bei Schwingung desselben.

Die Lageveränderung wird in Form einer Gleichstrom-Ausgangsspannung des in dem Vibrometer verwendeten Differentialtransformators gemessen. Bei einer schnellen Bewegung des Vibrationskörpers kann das Vibrometer jedoch die Lageveränderung nicht mehr messen, es sei denn, die Ansprechfrequenz der Ausgangsspannung ist ausreichend groß. Bei herkömmlichen Vibrometern weist der Differentialtransformator eine Frequenz von nicht über 10 kHz zur Erregung der Primärwicklung desselben auf. Die Ansprechfrequenz der Ausgangsspannung des Differentialtransformators beträgt etwa ein Zehntel der Erregerfrequenz und ist nicht mehr als 1 kHz. Bei einem derartigen Differentialtransformator war es schwierig, eine sehr rasche Vibration genau zu messen, die aus einer plötzlichen Beschleunigung, einer plötzlichen Verlangsamung, einer Kollision oder Ähnlichem entsteht.

Das erfindungsgemäße Vibrometer basiert auf dem Gedanken, daß die Verwendung eines - wie bereits beschrieben - erfindungsgemäß ausgebildeten Differentialtransformators es ermöglicht, die Primärwicklung mit einem Wechselstrom hoher Frequenz zu erregen. Dann läßt sich die Ansprechfrequenz der Gleichstrom-Ausgangsspannung der Sekundärwicklungen selbstverständlich proportional zur Erregerfrequenz erhöhen, so daß ein Vibrationszustand bei hoher Geschwindigkeit sehr genau meßbar ist.

Ein typisches Vibrometer, das den herkömmlichen Differentialtransformator verwendet, ist wie in Fig. 6 dargestellt ausgebildet. Das Innere eines Gehäuses 1 ist mit einem Fluid 2 gefüllt, bei dem es sich normalerweise um Silikonöl handelt, das fest eingeschlossen ist. Ein Differentialtransformator 3 weist einen nicht-magnetischen röhrenförmigen Körper 9 auf, der an dem Gehäuse befestigt ist. Weiterhin weist der Differentialtransformator 3 einen Vibrationskörper 8 auf, der normalerweise aus Eisen besteht und durch nicht-magnetische Stützstäbe 6 und 7 mittels der schwingenden Enden zweier normalerweise aus Phosphorbronze bestehender Blattfedern 4 und 5 derart getragen ist, daß dieser innerhalb des röhrenförmigen Körpers 9 in Axialrichtung desselben bewegbar ist. Außerdem weist der Differentialtransformator eine Primärwicklung 11 und Sekundärwicklungen 12 und 13 auf, die um den äußeren Umfang des röhrenförmigen Körpers 9 gewickelt sind. Die anderen Enden der Blattfedern 4 und 5 sind jeweils an dem Gehäuse 1 befestigt. Die Primärwicklung 11 ist um den mittleren Bereich des röhrenförmigen Körpers 9 gewickelt, während die Sekundärwicklungen 12 und 13 jeweils auf beiden Seiten desselben gewickelt sind. Die Primärwicklung wird von einem Wechselstrom erregt. Eine auf das Gehäuse 1 übertragene vertikale Vibration verursacht eine vertikale Vibration der Blattfedern 4 und 5, wobei diese Vibration durch das Fluid 2 auf ein geeignetes Maß abgeschwächt wird. Die Vibration der Blattfedern 4 und 5 wird auf den Vibrationskörper 8 übertragen. Die Lageveränderung des Körpers 8 wird dann durch eine in Fig. 7 dargestellte Schaltungsanordnung gemessen.

Wird eine Wechselstrom-Spannung auf die Primärwicklung mittels eines Wechselstrom-Oszillators 10 aufgeprägt, so wird eine der Position oder der Lageveränderung des Vibrationskörpers 8 entsprechende Wechselstrom-Spannung in jeder der Sekundärwicklungen 12 und 13 induziert. Die so erhaltenen Spannungen werden mittels Gleichrichtern 14 und 15 in Gleich-

ströme gleichgerichtet. Die so erhaltenen Gleichströme werden durch Zeitkonstantenschaltungen geglättet, deren Zeitkonstanten mittels eines Kondensators 16 und eines Widerstands 18 sowie mittels eines weiteren Kondensators 17 und eines weiteren Widerstands 19 festgesetzt werden. Die Gleichströme werden verstärkt, indem diese auf die Basisanschlüsse von Transistoren 20 und 21 aufgeprägt werden, die über Widerstände 22 und 23 als Emitterfolger geschaltet sind. Dann erscheinen Gleichstrom-Ausgangsspannungen an den Emitteranschlüssen 24 bzw. 25 dieser Transistoren, wobei eine zwischen den beiden Anschlüssen erhaltene Gleichstrom-Spannung die Differenz zwischen den in den Sekundärwicklungen 12 und 13 induzierten Wechselstrom-Spannungen darstellt. Somit stellt dies die Lageveränderung des Vibrationskörpers 8 dar.

Wie bereits beschrieben wird zur Erzielung einer Gleichstrom-Ausgangsspannung die in jeder Sekundärwicklung erzeugte Wechselstrom-Spannung in eine Gleichstrom-Spannung gleichgerichtet und geglättet, wobei die Welligkeit derselben somit reduziert wird. Dabei wird der Glättungsvorgang dadurch ausgeführt, daß die durch den Widerstand und den Kondensator festgesetzte Zeitkonstante im allgemeinen auf einen derartigen Wert eingestellt wird, der mindestens dreimal so groß ist wie die Periodendauer der in der Sekundärwicklung erzeugten Wechselstrom-Frequenz. Demgemäß beträgt die Ansprechfrequenz der Gleichstrom-Ausgangsspannung im allgemeinen ein Zehntel der Wechselstrom-Frequenz der Sekundärwicklungen, d.h. der an die Primärwicklung angelegten Erregerfrequenz.

Aus den vorstehenden Ausführungen geht hervor, daß die Sekundärwicklungen eines Differentialtransformators des herkömmlichen Vibrometers von der Primärwicklung entfernt angeordnet sind. Wenn die Primärwicklung mit einem Wechselstrom hoher Frequenz von über 10 kHz erregt wird, erreichen die magnetischen Kraftlinien die Sekundärwicklungen nicht ausreichend. Somit ist das herkömmliche Vibrometer nicht in der

Lage, eine hohe Spannung in jeder der Sekundärwicklungen zu induzieren. Daher wird die Primärwicklung des Differentialtransformators in dem herkömmlichen Vibrometer mit einer niedrigen Frequenz von nicht über 10 kHz erregt.

Da außerdem die Ansprechfrequenz der durch die Sekundärwicklungen erhaltenen Gleichstrom-Ausgangsspannung wie bereits erwähnt ein Zehntel der an die Primärwicklung angelegten Erregerfrequenz beträgt, führt die Verwendung einer Frequenz von nicht über 10 kHz für die Erregung der Primärwicklung zu einer Ansprechfrequenz von nicht über 1 kHz. Bei dem herkömmlichen Vibrometer ist es somit schwierig, eine so schnelle Vibration genau zu messen, die sich z.B. bei einer Kollision ergibt.

Wie bereits beschrieben ermöglicht das erfindungsgemäße Vibrometer das Aufprägen eines Stroms hoher Frequenz auf die Primärwicklung, um somit die Ansprechfrequenz der durch die Sekundärwicklungen erzeugten Gleichstrom-Ausgangsspannung zu erhöhen, so daß sich eine sehr schnelle Vibration genau messen läßt. Ein röhrenförmiger Körper ist von einer Federanordnung getragen. Ein Vibrationskörper ist innerhalb des röhrenförmigen Körpers in Axialrichtung desselben bewegbar, wobei dessen Vibration durch ein Fluid gedämpft wird. Ein Merkmal der Erfindung besteht darin, daß eine Primärwicklung in einer oder zwei Schichten um den äußeren Umfang des röhrenförmigen Körpers gewickelt ist, während zwei Sekundärwicklungen in einer erforderlichen Anzahl von Windungen direkt über die Primärwicklung gewickelt sind, und zwar derart, daß diese sich vom mittleren Bereich des röhrenförmigen Körpers jeweils nach rechts bzw. nach links erstrecken.

Mit anderen Worten heißt das, daß die Sekundärwicklungen in der Nähe der Primärwicklung angeordnet sind, um somit in jeder der Sekundärwicklungen durch Wickeln derselben direkt auf die Primärwicklung problemlos eine Spannung zu induzieren.

Dabei wird bei der Primärwicklung durch Wickeln derselben in einer oder zwei Schichten verhindert, daß diese eine überaus hohe Impedanz aufweist, so daß ein Wechselstrom hoher Frequenz bei der Erregung der Primärwicklung verwendbar ist. Demgemäß läßt sich die Ansprechfrequenz der Gleichstrom-Ausgangsspannung ebenfalls proportional dazu erhöhen, um einen hochschnellen Vibrationszustand genau zu messen.

Erfindungsgemäß läßt sich die Frequenz des Stroms zur Erregung der Primärwicklung auf einen Wert zwischen 50 kHz und 2 MHz festsetzen. Die Ansprechfrequenz der Gleichstrom-Ausgangsspannung erhält man aus der Differenz zwischen den Spannungen, die mittels der in Fig. 7 gezeigten Gleichrichterschaltungen gleichgerichtet und geglättet werden. Da die Ansprechfrequenz wie bereits erwähnt ein Zehntel der Erregerfrequenz beträgt, beträgt diese 5 bis 200 kHz. Dieser Wert ist viel höher als die Ansprechfrequenz von 1 kHz bei dem herkömmlichen Vibrometer. Das erfindungsgemäße Vibrometer ist somit in der Lage, einen hochschnellen Vibrationszustand genau zu messen.

Ein weiterer Gesichtspunkt der Erfindung besteht darin, einen Differentialdetektor oder Differentialtransformator zu schaffen, der für die Messung der Lageveränderung eines zu messenden Elements vorteilhaft ist, wenn die Lageveränderung gering ist.

Wie bereits in bezug auf den ersten Gesichtspunkt der Erfindung erwähnt wurde, ist der herkömmliche normale Differentialtransformator folgendermaßen aufgebaut, wie auch in Fig. 1 dargestellt ist: Eine Primärwicklung 2 ist um den mittleren Bereich einer zylindrischen röhrenförmigen Spule 1 gewickelt. Zwei Sekundärwicklungen 4 und 6 sind auf beiden Seiten der Primärwicklung 2 gewickelt. Ein Kern 8 ist in die Durchführung der Spule 1 eingesetzt. Der Kern 8 ist mittels

eines Stützstabes 9 getragen und in Axialrichtung der Spule bewegbar. Die Leitungsverbindung ist so ausgeführt, wie z.B. in Fig. 2 dargestellt ist. Ein Wechselstrom wird über die Leitungsdrähte 3 auf die Primärwicklung 2 aufgeprägt. Das Ausmaß der Bewegung des zu messenden Elements erhält man in Form einer Spannung, die zwischen den Leitungsdrähten 5 und 7 der beiden Sekundärwicklungen 4 und 6 gemäß der Lageveränderung der Kerns erzeugt wird, der auf die Bewegung des zu vermessenden Elements anspricht.

Der für einen derartigen üblichen Differentialtransformator verwendete Kern besteht aus einem ferromagnetischen Metallmaterial mit hoher Permeabilität, wie Eisen. Die spezifische magnetische Suszeptibilität von Eisen beträgt etwa 10^{-3} bis 10^{-6} elektromagnetische Einheiten. Diese hohe Permeabilität zieht viele magnetische Kraftlinien an, die sich bei Bewegung des Kerns ebenfalls bewegen. Dies verursacht, daß sich die in den beiden Sekundärwicklungen induzierten Spannungen dementsprechend verändern, so daß die mechanische Lageveränderung des Kerns in Form einer Ausgangsspannung des Differentialtransformators vorliegt. Da sich jedoch die Verteilung der durch die Primärwicklung erzeugten magnetischen Kraftlinien mit der Bewegung des Kerns verändert, geht die Verteilungssymmetrie der magnetischen Kraftlinien verloren. Aus diesem Grund ist es schwierig, die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung in einem korrekt proportionalen Verhältnis zueinander zu halten. Um diese in einem korrekt proportionalen Verhältnis innerhalb eines bestimmten Bereichs zu halten, werden Bemühungen hinsichtlich der zu verwendenden Frequenz, der Anzahl der Wicklungswindungen, der Breite der Spule sowie der Position und der Länge derselben unternommen.

Bei einem Differentialtransformator mit kurzem Hub läßt die geringe Breite der Wicklung kaum einen Bereich übrig, in dem sich die magnetischen Kraftlinien gleichmäßig vertei-

len können. Aus diesem Grund ist es trotz aller struktureller Bestrebungen schwierig, die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung in einem genau proportionalen Verhältnis zueinander zu halten. Außerdem wird bei kurzem Hub für die Erregung der Primärwicklung eine hohe Frequenz verwendet, da die Wicklungsbreite sowie die Anzahl der Wicklungswindungen gering sind. Die Verwendung einer hohen Frequenz führt jedoch zu einem beträchtlich hohen Betrag eines Wirbelstromverlustes, der in dem ferromagnetischen Kern entsteht. Hierdurch wird eine durch die hohe Permeabilität - erzielbare, vorteilhafte Wirkung gemindert, und dies führt schließlich zu einer niedrigen Ausgangsspannung.

Der in bezug auf den ersten Gesichtspunkt der Erfindung vorstehend beschriebene Differentialtransformator weist einen einzigartigen strukturellen Aufbau auf, mit dem sich die Größe desselben in einem höchstmöglichen Maß reduzieren läßt. Außerdem ermöglicht dieser Differentialtransformator ein Erregen der Primärwicklung mit einem Wechselstrom hoher Frequenz von 50 kHz bis 2 MHz. Die Verwendung einer derart hohen Frequenz bringt jedoch ein Problem mit sich, nämlich daß ein Wirbelstromverlust in einem beträchtlichen Ausmaß in dem Eisenkern auftritt.

Für allgemeine Messungen in der Industrie ist häufig ein Differentialtransformator mit kurzem Hub notwendig. Metallmaterialien, wie Eisen und Stahl, die häufig verwendet werden, weisen eine hohe Starrheit auf und werden von einer äußeren Kraft nicht sehr deformiert. Aus diesem Grund ist es bei einer aus einem derartigen starren Metallmaterial bestehenden Struktur, Maschine usw. erforderlich, eine sehr geringfügige Lageveränderung zu messen. Außerdem ist es bei Präzisionsmessungen, wie bei Messung eines Fehlers in den Abmessungen eines Erzeugnisses, der Zusammensetzung von Kugellagern, der Messung der Dicke einer dünnen Platte, der Messung

der Deformation eines Spannungsringes und ähnlichem, normalerweise erforderlich, ein geringfügiges Ausmaß der Lageveränderung von nicht mehr als 1 oder 2 mm zu messen. Herkömmliche Differentialtransformatoren, die als Detektoren eines solchen kurzen Hubes vorgesehen waren, weisen die gleichen Nachteile auf, die bereits erwähnt wurden. Aus diesem Grund bestand ein Bedürfnis, diese Nachteile zu überwinden. Die Erfindung ist diesem Bedürfnis gerecht geworden.

Der erfindungsgemäße Differentialtransformator weist folgende Elemente auf: Einen Kern oder ein Gehäuse, das sich zusammen mit einem zu messenden Element bewegt; eine Primärwicklung, die entlang der Bewegungsbahn des Kerns oder des Gehäuses angeordnet ist und mit einem Wechselstrom erregt wird; und Sekundärwicklungen, die eine Spannungsdifferenz proportional zur Bewegung des Kerns oder des Gehäuses erzeugen. Ein Merkmal des Differentialtransformators besteht darin, daß der Kern oder das Gehäuse aus einem leitenden Metall niedriger Permeabilität gebildet ist, während die Primärwicklung für das Aufprägen eines Erregerstroms hoher Frequenz ausgelegt ist. Das leitende Metall niedriger Permeabilität kann ausgewählt werden z.B. aus Aluminium, Silber, Kupfer usw. sowie aus Legierungen solcher Materialien, insbesondere aus Messing, Duraluminium und Phosphorbronze. Die spezifische magnetische Suszeptibilität des leitenden Metalls beträgt 10^{-3} bis 10^{-6} elektromagnetische Einheiten. Die Frequenz liegt im allgemeinen im Bereich von 50 kHz bis 2 MHz.

Bei dem herkömmlichen Differentialtransformator zieht ein Kern aus ferromagnetischem Material viele magnetische Kraftlinien an, während sich der Kern bewegt. Dies macht es schwierig, die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung in einem korrekt proportionalen Verhältnis zueinander zu halten. Dieses Problem wird mit dem erfindungsgemäßen Differentialtransformator durch die Verwendung eines Kerns aus

einem Metallmaterial niedriger Permeabilität gelöst, welches die Verteilung der magnetischen Kraftlinien nicht zerstört. Die erfindungsgemäße Anordnung basiert auf dem Grundgedanken, daß bei Verwendung eines derartigen Kerns ein in dem Kern entstehender Wirbelstromverlust die magnetischen Kraftlinien schwächt und somit dazu dient, die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung in einem korrekt proportionalen Verhältnis zueinander zu halten.

Im allgemeinen verursacht ein leitendes Metall niedriger Permeabilität keine Stärkung oder Schwächung der magnetischen Kraftlinien aufgrund der Permeabilität. Da ein derartiges Metallmaterial nicht magnetisiert ist, gibt es keinen Hystereseverlust aufgrund eines Wechselfeldes. Es gibt nur einen Wirbelstromverlust, dessen Wert dem Quadrat der Frequenz proportional ist. Bei einer hohen Frequenz ist somit der Wirbelstromverlust sehr groß, und dies verursacht einen hohen magnetischen Widerstand, der die magnetischen Kraftlinien schwächt.

Demgemäß werden bei Verwendung eines derartigen Metallmaterials für den Kern eines mit einer hohen Frequenz zu erregenden Differentialtransformators oder Differentialdetektors die magnetischen Kraftlinien in dem Teil, in dem sich der Kern befindet, aufgrund eines Wirbelstromverlustes geschwächt. Aus diesem Grund werden die Spannungen, die in den Bereichen der Sekundärwicklungen induziert wurden, die in diesem Teil liegen, niedriger. Wenn sich der Kern in gleichem Abstand zu den beiden Sekundärwicklungen befindet, beträgt die Ausgangsspannung null. Bei Bewegung des Kerns werden die magnetischen Kraftlinien jedoch in einem Maß schwächer, das dem Maß der Bewegung, d.h. der Lageveränderung, des Kerns proportional ist. Dann wird die induzierte Spannung in der auf der einen Seite befindlichen Sekundärwicklung in dem Maß geringer, in dem die magnetischen Kraftlinien geschwächt sind, während die induzierte

Spannung in der anderen Sekundärwicklung auf der anderen Seite in einem der Lageveränderung des Kerns proportionalen Maß zunimmt. Demgemäß ändert sich die Differenz zwischen den beiden induzierten Spannungen darstellende Ausgangsspannung proportional zur Lageveränderung des Kerns.

Aufgrund der Tatsache, daß der Kern des erfindungsgemäßen Differentialtransformators eine niedrige Permeabilität aufweist, zieht er die magnetischen Kraftlinien nicht an. Die Bewegung des Kerns verursacht somit keine Veränderung in der Verteilung der magnetischen Kraftlinien in den Wicklungen, so daß die Symmetrie beibehalten werden kann. Im Gegensatz zum herkömmlichen Transformator, der einen Kern hoher Permeabilität verwendet, lassen sich die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung des erfindungsgemäßen Transformators in einem genau proportionalen Verhältnis zueinander halten. Dieses Merkmal der Erfindung ist besonders vorteilhaft für einen Differentialtransformator oder Detektor mit kurzen Wicklungen und kurzem Hub.

Der pro Raumeinheit entstehende Wirbelstromverlust W_e läßt sich anhand der folgenden Formel darstellen:

$$W_e = \frac{1}{6\rho} \pi^2 \cdot f^2 \cdot B_m^2 \cdot t^2 \text{ [W/m}^3\text{]},$$

wobei ρ : den spezifischen Widerstand

π : das Verhältnis von Umfang zu Durchmesser

f : die Frequenz

B_m : die maximale magnetische Flußdichte und

t : die Dicke

darstellen.

Der Wirbelstromverlust ist proportional zum Quadrat der Frequenz und umgekehrt proportional zum spezifischen Widerstand. Demgemäß wird der Wirbelstromverlust in dem Maß größer, in dem der spezifische Widerstand des Metallmaterials abnimmt.

Da unter den leitenden Metallmaterialien niedriger Permeabilität Silber und Kupfer einen niedrigeren spezifischen Widerstand als Aluminium aufweisen, ist die Verwendung von Silber oder Kupfer zur Erzielung eines größeren Ausgangswertes vorzuziehen.

Ferner ist der spezifische Widerstand von Eisen ungefähr viermal so hoch wie der von Aluminium. In den Fällen, in denen ein Eisenkern verwendet wird, findet somit ein beträchtlich hoher Wirbelstromverlust statt, der etwa einem Viertel des Wirbelstromverlustes eines Aluminiumkerns entspricht. Dies zerstört die Wirkung der Permeabilität des Eisens in einem großen Ausmaß.

Wie aus der vorstehenden Beschreibung offensichtlich ist, ist es zur Erzielung einer höheren Ausgangsspannung wünschenswert, daß ein höherer Wirbelstromverlust in dem Kern entsteht. Dieser Wunsch läßt sich dadurch erfüllen, daß ein Erregerstrom hoher Frequenz auf die Primärwicklung aufgeprägt wird. Hinsichtlich der Herstellung der Wicklung gibt es jedoch eine Grenze für den verwendbaren Frequenzbereich. Versuchsergebnisse haben folgendes gezeigt: Für einen Differentialtransformator mit kurzem Hub von ± 2 bis 4 mm erleichtert die Verwendung einer Frequenz zwischen ca. 200 kHz und ca. 1 MHz den Betrieb. Für einen längeren Hub zwischen ± 10 bis 20 mm, der eine Erhöhung der Anzahl der Wicklungswindungen erforderlich macht, ist ein Frequenzbereich von nicht über 200 kHz und nicht unter 50 kHz vorzuziehen. Wenn die Frequenz 2 MHz übersteigt, fließt aufgrund der Kapazität zwischen den einzelnen Strängen der Wicklung ein Skin- bzw. Oberflächenstrom. Dieser neigt dazu, den für die Erregung der Wicklung wirksamen Strom zu vermindern. In Anbetracht vorstehender Ausführungen ist die verwendbare Frequenz erfindungsgemäß auf einen Bereich von ca. 50 kHz bis ca. 2 MHz angesetzt.

Ein weiterer Gesichtspunkt der Erfindung besteht darin, einen Differentialtransformator oder Differentialdetektor zu schaffen, der nicht nur das Problem löst, daß die Ausgangsspannung eines Differentialtransformators mit kurzem Hub abnimmt, sondern der auch die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung in einem genau proportionalen Verhältnis zueinander hält. (dies wird nachstehend als Linearität bezeichnet), und zwar unabhängig von der Tatsache, ob der Durchmesser des Kerns groß oder klein ist. Bei dem vorstehend beschriebenen Differentialtransformator wurde festgestellt, daß dieser noch einen Nachteil aufweist, nämlich daß der Transformator keine hohe Ausgangsspannung erbringt, wenn der Kerndurchmesser nicht mehr als ca. 5 mm beträgt. Dieser Nachteil des vorstehend beschriebenen Differentialtransformators wird folgendem zugeschrieben:

Die magnetischen Kraftlinien werden durch einen durch die Windungen der Primärwicklung fließenden Erregerstrom erzeugt. Dann ist die von den magnetischen Kraftlinien erreichbare Distanz aufgrund der hohen Frequenz klein. Bei großem Durchmesser der Wicklung laufen die meisten der so erzeugten magnetischen Kraftlinien durch den Hohlraum der Spule, in dem sich der Kern bewegt, hindurch. Somit ist der Wert des durch die magnetischen Kraftlinien erzeugten Wirbelstromverlustes während der Bewegung des Kerns durch den Hohlraum der Spule groß, was somit zu einer großen Ausgangsspannung führt. Andererseits werden, wenn der Durchmesser des Hohlraums der Spule aufgrund eines kleineren Durchmessers der Wicklung kleiner ist, die in der Primärwicklung erzeugten magnetischen Kraftlinien auf andere Teile als den Hohlraum der Spule verteilt. Dann bleiben innerhalb des Hohlraums der Spule weniger magnetische Kraftlinien. Dies reduziert den Wert des Wirbelstroms, der während der Bewegung des Kerns durch den Hohlraum der Spule von den magnetischen Kraftlinien verursacht wird. Somit ist es in einem derartigen Fall kaum möglich, eine hohe Ausgangsspannung des Differentialtransformators zu erhalten.

Wie bereits erwähnt, soll unter dem letztgenannten Gesichtspunkt der Erfindung das Problem gelöst werden, daß die Ausgangsspannung eines Differentialtransformators kleinen Durchmessers abnimmt, und es soll unabhängig von der Tatsache, ob der Kerndurchmesser klein oder groß ist, eine gute Linearität erzielt werden.

Ein in einem Kern erzeugter Wirbelstrom fließt im wesentlichen an der äußeren Umfangsfläche des Kerns entlang. Aus diesem Grund muß es sich bei dem aus einem leitenden Metallmaterial niedriger Permeabilität bestehenden Kern nicht um eine massive Metallstange handeln, sondern dieser kann auch die Form eines Rings aufweisen, dessen Dicke 1 oder 2 mm nicht übersteigt. Mit anderen Worten heißt das, daß sich bei einem in Axialrichtung des Differentialtransformators bewegbaren ringförmigen Kern mit einer Dicke von nicht mehr als 1 oder 2 mm die gleiche Ausgangsspannung durch den Wirbelstromverlust erzielen läßt wie die Ausgangsspannung, die bei einem Transformator Kern erzielt wird, der die Form einer massiven Stange aufweist.

Durch das ringförmige Loch dieses dünnen ringförmigen Kerns wird ein Hilfskern aus einem ferromagnetischen Material hoher Permeabilität, wie eine Eisenstange oder ein Eisenrohr, dessen Außendurchmesser so groß wie möglich ist, derart eingesetzt, daß sich dieser über die gesamte Breite der Primärwicklung erstreckt. Bezüglich der Anordnung kann das Verhältnis zwischen dem Kern und dem Hilfskern entweder so sein, daß der Kern auf dem Hilfskern verschiebbar ist oder so, daß der Hilfskern durch den ringförmigen Kern hindurchragt, um somit als Stützstab zu dienen und zusammen mit dem Kern bewegbar zu sein. Im letzteren Fall muß der Hilfskern jedoch länger sein als die gesamte Breite der Primärwicklung und/oder außerdem innerhalb der gesamten Breite der Primärwicklung bleiben, solange sich der Hilfskern im Lageveränderungsbereich befindet.

Wenn in dem ringförmigen Loch des ringförmigen leitenden Metallkerns niedriger Permeabilität der ferromagnetische Hilfskern hoher Permeabilität so angeordnet ist, daß sich dieser über die gesamte Breite der Primärwicklung erstreckt, werden fast alle der von der Primärwicklung erzeugten magnetischen Kraftlinien von dem Hilfskern angezogen, und somit laufen diese durch das Innere des Hilfskerns. Dies verursacht eine Abnahme des magnetischen Widerstands. Im Vergleich zu einem Fall, in dem kein Hilfskern vorgesehen ist, werden die von der Primärwicklung erzeugten magnetischen Kraftlinien durch die Anwesenheit des Hilfskerns außerordentlich gestärkt. Im Gegensatz zu dem Fall ohne den Hilfskern gewährleistet die Verwendung des Hilfskerns eine homogene Verteilung der magnetischen Kraftlinien, die von der Primärwicklung innerhalb des Hohlraums der Spule erzeugt werden.

Der aus einem ferromagnetischen Material bestehende Hilfskern, der die magnetischen Kraftlinien verstärkt, erhöht die in den Sekundärwicklungen induzierten Spannungen. Da jedoch der Hilfskern symmetrisch über die gesamte Breite der Primärwicklung angeordnet ist, sind die in den beiden Sekundärwicklungen induzierten Spannungen einander gleich. Somit wird die Ausgangsspannung des Differentialtransformators durch den Hilfskern nicht verändert.

Bei dem aus einem ferromagnetischen Material bestehenden Hilfskern, der sich über die gesamte Breite der Primärwicklung erstreckt, werden die magnetischen Kraftlinien der Primärwicklung somit verstärkt, ohne dabei irgendeine Veränderung bei der Ausgangsspannung des Differentialtransformators zu verursachen. Außerdem stellt sich ein ausgezeichneter Zustand ein, nämlich daß die magnetischen Kraftlinien innerhalb des Hohlraums der Spule homogen verteilt sind. Dies führt nicht nur zu einer Erhöhung des Wirbelstromverlustes, der in dem leitenden Metallkern niedriger Permeabilität entsteht, was wiederum zu einer Erhöhung der Ausgangs-

spannung des Transformators führt, sondern dient auch dazu, das proportionale Verhältnis der Lageveränderung des Kerns zu der Ausgangsspannung, d.h. die Linearität, zu verbessern. Demgemäß wird der Wert der Rest-Nullspannung ebenfalls niedriger.

Außerdem läßt sich die vorteilhafte Wirkung des ferromagnetischen Hilfskerns unabhängig davon erzielen, ob der Wicklungsdurchmesser groß oder klein ist. Diejenigen magnetischen Kraftlinien, die ohne Hilfskern auf andere Teile als den Hohlraum der Spule verteilt würden, werden von dem Hilfskern angezogen und somit dazu gezwungen, durch den Hohlraum hindurchzugehen. Aus diesem Grund liegen fast alle der magnetischen Kraftlinien innerhalb des Hohlraums der Spule. Die Verwendung des Hilfskerns schaltet somit die Gefahr aus, daß die Verwendung eines Kerns mit kleinem Durchmesser zu einer niedrigeren Ausgangsspannung des Differentialtransformators führen könnte.

Der Wirbelstromverlust W_e ist wie bereits erwähnt proportional zum Quadrat der Frequenz und umgekehrt proportional zum spezifischen Widerstand. Er ist ebenfalls proportional zum Quadrat der maximalen magnetischen Flußdichte. Demgemäß steigt der Wirbelstromverlust mit der maximalen Flußdichte an. Bei demjenigen erfindungsgemäßen Differentialtransformator, bei dem der magnetische Widerstand reduziert ist, um die magnetische Flußdichte durch Vorsehen des Hilfskerns aus einem ferromagnetischen Material zu erhöhen, ist der Wert des Wirbelstromverlustes größer als bei einem Differentialtransformator ohne Hilfskern. Aus diesem Grund steigt der Wert der Ausgangsspannung des Differentialtransformators ebenfalls an. Da außerdem der Wirbelstromverlust ebenfalls in dem Maß zunimmt, in dem der spezifische Widerstand abnimmt, ist unter den leitenden Metallmaterialien niedriger Permeabilität die Verwendung von Silber oder Kupfer zur Erzielung eines

höheren Ausgangswertes vorteilhafter als die Verwendung von Aluminium.

Während zur Erhöhung des Wirbelstromverlustes ein Erregerstrom hoher Frequenz auf die Primärwicklung aufgeprägt wird, ist in bezug auf die Herstellung der Wicklung unweigerlich eine bestimmte Begrenzung des verwendbaren Frequenzbereiches erforderlich. Versuchsergebnisse haben gezeigt, daß die für den Differentialtransformator gemäß dem letztgenannten Gesichtspunkt der Erfindung verwendbaren Frequenzen zwischen ca. 50 kHz und ca. 2 MHz liegen.

Besonders bevorzugte Differentialtransformatoren oder Differentialdetektoren sind wie folgt ausgebildet:

Derartige Transformatoren oder Detektoren weisen jeweils einen sich zusammen mit einem zu bestimmenden Gegenstand bewegendem Kern bzw. ein Gehäuse, eine entlang der Bewegungsbahn des Kerns angeordnete und mit einem Wechselstrom hoher Frequenz zwischen 50 und 2000 kHz erregbare Primärwicklung sowie zwei Sekundärwicklungen auf, die direkt über die Primärwicklung gewickelt sind und eine Spannungsdifferenz erzeugen, die proportional zur Lageveränderung des Kerns ist. Diese Anordnung ermöglicht nicht nur eine Reduzierung der Größe, sondern induziert auch ausreichend hohe Spannungen in den Sekundärwicklungen und erzeugt außerdem eine angemessen hohe Ausgangsspannung. Modifikationen des strukturellen Aufbaus der Differentialtransformatoren können wie folgt aussehen:

- a) Der Kern besteht aus einem leitenden Metall niedriger Permeabilität um somit den Nachteil herkömmlicher Differentialtransformatoren auszuschalten, der auf die Verwendung von ferromagnetischen Materialien für die Kerne zurückzuführen ist, und außerdem, um die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung in einem genau proportionalen Verhältnis zueinander (Linearität) zu halten. Dies ist besonders dort vorteilhaft, wo der Hub

des Transformators kurz ist.

- b) Der Kern ist ringförmig ausgebildet und besteht aus einem leitenden Metall niedriger Permeabilität. Ein Stab oder ein Rohr hoher Permeabilität erstreckt sich über die gesamte Breite der Primärwicklung und ist so angeordnet, daß er durch die Ringöffnung des Kerns hindurchragt. Dies verhindert ein Absinken der Ausgangsspannung, wenn der Durchmesser des Kerns klein ist, so daß unabhängig von der Tatsache, ob der Kerndurchmesser groß oder klein ist, eine ausgezeichnete Linearität erzielbar ist.

Außerdem sieht die Erfindung ein Vibrometer vor, das einen Differentialtransformator des beschriebenen strukturellen Aufbaus verwendet, wobei ein derartiges Vibrometer eine Gleichstrom-Ausgangsspannung hoher Ansprechfrequenz erzeugt und somit in der Lage ist, eine Vibration hoher Geschwindigkeit genau zu messen.

Die Erfindung und Weiterbildungen der Erfindung werden im folgenden anhand der teilweise schematischen Darstellungen mehrerer Ausführungsbeispiele noch näher erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1 eine Schnittdarstellung eines herkömmlichen Differentialtransformators,

Fig. 2 ein Schaltbild unter Darstellung von Verbindungen des Differentialtransformators der Fig. 1,

Fig. 3 eine Schnittdarstellung unter Darstellung eines Differentialtransformators als erste Ausführungsform der Erfindung,

Fig. 4 ein Schaltbild der ersten Ausführungsform sowie Verbindungen derselben,

Fig. 5 ein Schaubild unter Darstellung der Kennlinien der

ersten Ausführungsform,

- Fig. 6 bis 8
Vibrometer, die Differentialtransformatoren verwenden,
wobei zeigen:
- Fig. 6 eine Schnittdarstellung eines herkömmlichen Vibrometers,
- Fig. 7 ein Schaltbild der Meßschaltung des herkömmlichen Vibrometers,
- Fig. 8 eine Schnittdarstellung unter Darstellung eines Vibrometers, das einen erfindungsgemäßen Differentialtransformator als zweite Ausführungsform der Erfindung verwendet,
- Fig. 9 bis 19
Differentialtransformatoren mit kurzem Hub als dritte Ausführungsform der Erfindung, wobei zeigen:
- Fig. 9 eine Schnittdarstellung der dritten Ausführungsform der Erfindung,
- Fig. 10 eine Perspektivdarstellung einer für die dritte Ausführungsform verwendeten Spule,
- Fig. 11 ein Schaltbild, das die Verbindungen der dritten Ausführungsform darstellt,
- Fig. 12 ein Schaubild, das das Verhältnis der Lageveränderung des Kerns zur Ausgangsspannung darstellt,
- Fig. 13, 14, 16 und 18
Schnittdarstellungen von modifizierten Beispielen der in Fig. 9 dargestellten dritten Ausführungsform,
- Fig. 15 und 17
Schaltbilder, die die Verbindungen der in Fig. 14 bzw. 18 dargestellten modifizierten Beispiele zeigen,
- Fig. 19 ein Schaubild, das das Verhältnis der Lageveränderung des Kerns zur Ausgangsspannung des in Fig. 18 dargestellten modifizierten Beispiels zeigt,

Fig. 20 bis 23

Differentialtransformatoren als vierte Ausführungsform der Erfindung, wobei zeigen:

Fig. 20 eine Schnittdarstellung der vierten Ausführungsform der Erfindung,

Fig. 21 eine Perspektivdarstellung der für die vierte Ausführungsform verwendeten Spule,

Fig. 22 ein Schaltbild, das die Verbindungen der vierten Ausführungsform darstellt, und

Fig. 23 eine Schnittdarstellung eines modifizierten Beispiels der in Fig. 20 dargestellten Ausführungsform.

Erste Ausführungsform

Die Fig. 3 bis 5 zeigen einen Differentialtransformator als erste Ausführungsform der Erfindung. Der strukturelle Aufbau des Ausführungsbeispiels sieht wie folgt aus: Eine Primärwicklung 12 ist in einer oder zwei Schichten über die gesamte Länge einer Spule 11 gewickelt, die aus einem nichtmagnetischen Material hergestellt ist. Die Primärwicklung 12 ist mit Leitungsdrähten 13 versehen. Zwei Sekundärwicklungen 14 und 16 sind direkt über die Primärwicklung 12 gewickelt. Die Leitungsdrähte 15 und 17 der Sekundärwicklungen 14 und 16 sind wie in Fig. 4 dargestellt differenzmäßig miteinander verbunden. In einer in der Spule 11 axial vorgesehenen Öffnung 21 ist ein Eisenkern 18 eingesetzt, der von einem Stützstab 19 aus nichtmagnetischem Material getragen ist und innerhalb der axialen Öffnung 21 verschiebbar ist. Ein aus einem nichtmagnetischen Material, wie Kunststoffmaterial, hergestellter Ring 20 mit einem weggeschnittenen Teil wird nach Winden der Wicklung um die Spule 11 schnappend um den mittleren Bereich der Primärwicklung 12 befestigt. Der Ring 20 erleichtert den Windungsvorgang bei den Sekundärwicklungen 14 und 16.

Eine ausreichend hohe Spannung läßt sich durch Erregen der

Primärwicklung 12 mit einem Wechselstrom von einigen mA sowie durch Anlegen einer Spannung von einigen V mit einer so hohen Frequenz wie z.B. zwischen 50 und 2000 kHz in jeder der Sekundärwicklungen 14 und 16 induzieren.

Nun wird auf Fig. 4 Bezug genommen. Wenn der Eisenkern 18 in der Mitte zwischen den Sekundärwicklungen 14 und 16 befindet, werden gleiche Spannungen in den Sekundärwicklungen 14 und 16 induziert. Unter einer derartigen Bedingung ist somit die Spannung zwischen den differenzmäßig verbundenen Leitungsdrähten 15 und 17 gleich null. Unter der in Fig. 3 dargestellten Bedingung steigt bei Bewegung des Eisenkerns 18 nach links die in ^{der} Sekundärwicklung 14 induzierte Spannung an, während die in der anderen Sekundärwicklung 16 induzierte Spannung abnimmt. Dann erscheint eine Spannung, die der Differenz zwischen der höheren Spannung und der niedrigeren Spannung entspricht, zwischen den Leitungsdrähten 15 und 17. Umgekehrt wird bei Bewegung des Eisenkerns 18 nach rechts die in der Sekundärwicklung 14 induzierte Spannung niedriger und die in der Sekundärwicklung 16 induzierte Spannung höher, während zwischen den Leitungsdrähten eine Spannung erscheint, die der Differenz zwischen der höheren und der niedrigeren Spannung gleich ist.

Stellt man die Lageveränderung des Eisenkerns 18 an der Abszisse und die Spannung an der Ordinate dar, weist die zwischen den Leitungsdrähten auftretende Spannung wie beim herkömmlichen Differentialtransformator die Form eines V auf, wie in Fig. 5 dargestellt ist. In ähnlicher Weise läßt sich zur Festlegung des längst möglichen Meßbereichs oder Hubes, in dem die Lageveränderung des Eisenkerns 18 und die Ausgangsspannung in geeigneter Proportion gehalten sind, eine geeignete Länge für den Eisenkern 18 je nach Form des Differentialtransformators und der verwendeten Frequenz experimentell auswählen.

Wie bereits beschrieben, weist ein Differentialtransformator gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung eine Primärwicklung auf, die mit einem Wechselstrom hoher Frequenz zwischen 50 und 2000 kHz erregt wird, während die beiden Sekundärwicklungen direkt über die Primärwicklung gewickelt sind. Diese Anordnung ermöglicht eine erhebliche Reduzierung der Anzahl der Windungen sowohl für die Primärwicklung als auch für die Sekundärwicklungen. Die reduzierte Anzahl von Windungen erlaubt wiederum eine erhebliche Reduzierung des Außendurchmessers und des Gewichts des Differentialtransformators und erleichtert somit die Fertigungsarbeiten.

Bei Differentialtransformatoren, die mit niedrigen Frequenzen erregt werden, führt das Anlegen einer Spannung an die Primärwicklung im allgemeinen zur Erzeugung einer magnetischen Anziehungskraft, die den Eisenkern in Richtung auf das Zentrum der Wicklung zieht. Im Gegensatz dazu ist beim erfindungsgemäßen Differentialtransformator, der mit einer sehr hohen Frequenz erregt werden soll, die magnetische Anziehung so gering, daß sogar ein kleiner leichter Eisenkern nicht angezogen wird, was somit zu einem Vorteil beim Betrieb führt.

Bei der Herstellung von Differentialtransformatoren ist das Verfahren, zwei Drähte zusammen zu wickeln, allgemein bekannt. In diesem Fall wird das Verhältnis der Windungen zwischen den Primär- und Sekundärwicklungen 1:0,5. Demgemäß sind die in den Sekundärwicklungen induzierten Spannungen sowie die Ausgangsspannung klein. Trotz dieses Nachteils gewährleistet die Anwendung der Erfindung auf diesen Typ von Differentialtransformator die vorgenannten Verbesserungen im Vergleich zu herkömmlichen Erzeugnissen. Diese Modifizierungen liegen selbstverständlich im Rahmen der Erfindung.

Die folgenden Beispiele dienen zur Veranschaulichung spezieller Details der Erfindung, wobei der Außendurchmesser

sowie der Innendurchmesser der Spule, die Anzahl der Windungen und Schichten sowie die Breite der Primärwicklung, die Anzahl der Windungen und Schichten der Sekundärwicklungen, die Erregerfrequenz und der Durchmesser sowie die Länge des Eisenkerns verändert wurden. Jeder der Differentialtransformatoren dieser Beispiele wurde wie folgt aufgebaut: Eine Primärwicklung wurde dadurch geschaffen, daß ein Transformator-draht von 0,10 mm (mit der Ausnahme von 0,12 mm bei Beispiel 1) Durchmesser in der bestimmten Anzahl von Windungen in einer oder zwei Schichten sowie in der bestimmten Breite über die gesamte Länge einer Spule gewickelt wurde. Zwei Sekundärwicklungen wurden dadurch geschaffen, daß Polyurethan-Transformator-drähte des gleichen Durchmessers direkt über die Primärwicklung gewickelt wurden, wobei man ausgehend von der Mitte der Primärwicklung zum einen Ende derselben für die eine Sekundärwicklung und zum anderen Ende derselben für die andere Sekundärwicklung in der bestimmten Anzahl von Windungen und Schichten vorging. In der Spule war ein Eisenkern mit bestimmtem Durchmesser und bestimmter Länge verschiebbar eingesetzt. Bei derart hergestellten erfindungsgemäßen Differentialtransformatoren wurde die Primärwicklung jedes Transformators mit einem Wechselstrom von 1 V und mit Sinuswellenform mit einer bestimmten Frequenz erregt. Es hat sich dann herausgestellt, daß die Lageveränderung des Eisenkerns in dem bestimmten Proportionsbereich im wesentlichen in geeigneter Proportion zur Ausgangsspannung lag. Die für jedes Beispiel gegebenen Werte stellen angenäherte Mittelwerte der Ergebnisse der Versuche dar, die an mehreren für jedes der Beispiele vorbereiteten Transformatoren durchgeführt wurden.

Bei der Bestimmung des Wertes der Ausgangsspannung war kein Gehäuse an dem Differentialtransformator angebracht, d.h., die Wicklungen waren freigelegt. Die Ausgangsspannung kann etwas von dem gezeigten Wert abfallen, wenn das Gehäuse angebracht ist. Wenn es jedoch notwendig ist, kann eine hohe

Spannung mittels eines Verstärkers erreicht werden. In dieser Hinsicht gibt es kein Problem, da stabile Verstärker, wie bereits erwähnt, heutzutage verfügbar sind. Die Werte des Gleichstrom-Widerstands der Wicklungen sind sehr niedrig. Es scheint, daß bei diesen Werten erhebliche Meßfehler vorliegen. Fehler bei dem Gleichstrom-Widerstand haben jedoch nur geringe Auswirkung auf Differentialtransformatoren gemäß der Erfindung, die bei einer hohen Frequenz zu erregen sind, da die Impedanz der Primärwicklung hauptsächlich aus einem Blindwiderstand besteht.

B e i s p i e l 1

Ein leicht herstellbarer Differentialtransformator mit langem Hub.

- Kunststoffspule - Außendurchmesser: 5 mm,
Innendurchmesser: 3,2 mm,
- Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 1100; Anzahl der
Windungsschichten: 2;
Windungsbreite: 8 cm (Gleichstrom-
Widerstand: 34 Ohm)
- Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 1000; Anzahl der
Windungsschichten: 1 (Gleichstrom-
Widerstand: 31 Ohm)
- Erregerfrequenz : 100 kHz
- Primärwicklungs-
impedanz : 500 Ohm
- Außendurchmesser der
Wicklung: 8 mm oder weniger
- (1) Eisenkern - Durchmesser: 3 mm; Länge: 4 cm;
Proportionsbereich: ± 20 mm;
maximaler Ausgangswert : 1,4 V

- 31 - 85.

3127164

- (2) Eisenkern - Durchmesser: 3 mm; Länge: 6 cm;
Proportionsbereich: ± 30 mm;
maximaler Ausgangswert : 1,2 V.

Die Beispiele 2 bis 6 zeigen Differentialtransformatoren mit verschiedenen HÜben , wobei bei jedem Beispiel eine Spule mit kleinerem Durchmesser, nämlich von 4 mm, verwendet wird.

B e i s p i e l 2

- Kunststoffspule - Außendurchmesser: 4,0 mm;
Innendurchmesser: 2,4 mm
- Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 530; Anzahl der
Windungsschichten: 1 ;
Windungsbreite: 64 mm (Gleichstrom-
Widerstand: 18 Ohm)
- Sekundärwicklungen- Anzahl der Windungen: 430; Anzahl der
Windungsschichten: 2 (Gleichstrom-
Widerstand: 15 Ohm)
- Erregerfrequenz: 400 kHz
- Primärwicklungs-
impedanz: 300 Ohm
- Eisenkern: Durchmesser: 2,2 mm; Länge: 5 cm
- Proportionsbereich: ± 20 mm
- maximaler Ausgangs-
wert: 0,8 bis 1 V

B e i s p i e l 3

- Kunststoffspule - Außendurchmesser: 4 mm;
Innendurchmesser: 2,4 mm
- Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 350; Anzahl der
Windungsschichten: 1 ;

- 32 - 36.

Windungsbreite: 43 mm (Gleichstrom-
Widerstand: 14 Ohm)

Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 280; Anzahl der
Windungsschichten: 2 (Gleichstrom-
Widerstand: 12 Ohm)

Erregerfrequenz: 400 kHz

Primärwicklungs-
impedanz: 200 Ohm

Eisenkern - Durchmesser: 2,2 mm; Länge: 32 mm

Proportions-
bereich: ± 10 mm

maximaler Ausgangs-
wert: 0,6 bis 0,8 V

Die Beispiele 4 und 5 zeigen Differentialtransformatoren, bei denen das Verhältnis der Windungsanzahl der Primärwicklung zu der der Sekundärwicklungen ungefähr gleich war. Bei Beispiel 4 war die Primärwicklung jedoch in einer Schicht gewickelt, während bei Beispiel 5 die Primärwicklung in zwei Schichten gewickelt war. Bei dem erstgenannten Beispiel, bei dem die Anzahl der Windungen geringer war als bei dem zweiten, wurde eine höhere Frequenz verwendet. Bei Beispiel 4 erwies sich eine Frequenz von nicht weniger als 1 MHz als günstig, während sich bei Beispiel 5 eine Frequenz von ca. 500 kHz als ausreichend erwies.

B e i s p i e l 4

Kunststoffspule - Außendurchmesser: 4 mm;
Innendurchmesser: 2,4 mm

Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 180; Anzahl der
Windungsschichten: 1 ;
Windungsbreite: 23 mm (Gleichstrom-
Widerstand: 9 Ohm)

Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 130; Anzahl der
Windungsschichten: 2 (Gleichstrom-Wider-
stand: 7 Ohm)

Erregerfrequenz: 1 MHz bis 2 MHz

Eisenkern - Durchmesser: 2,2 mm; Länge: 18 mm

Proportionsbereich: \pm 5 mm

maximaler Ausgangs-
wert: bei 1 MHz: 0,3 V
bei 1,5 MHz: 0,6 V
bei 2 MHz: 0,3 V

B e i s p i e l 5

Kunststoffspule - Außendurchmesser: 4 mm;
Innendurchmesser: 2,4 mm

Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 370; Anzahl der
Windungsschichten: 2;
Windungsbreite: 23 mm (Gleichstrom-
Widerstand: 15 Ohm)

Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 300; Anzahl der
Windungsschichten: 4 (Gleichstrom-Wider-
stand: 13 Ohm)

Erregerfrequenz: 400 kHz

Primärwicklungs-
impedanz: 600 Ohm

Eisenkern - Durchmesser: 2,2 mm; Länge: 18 mm

Proportionsbereich: \pm 5 mm

maximaler Ausgangs-
wert: 0,5 V

B e i s p i e l 6

Dieses Beispiel zeigt einen Differentialtransformator mit
kurzem Hub. Dabei weist die Primärwicklung eine gerin-
gere Anzahl von Windungen sowie eine niedrigere Induktanz auf.

Dementsprechend ist es bevorzugt, die Impedanz der Primärwicklung durch Verwendung einer höheren Erregerfrequenz anzuheben.

Kunststoffspule -	Außendurchmesser: 4 mm; Innendurchmesser: 3,4 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 200; Anzahl der Windungsschichten: 2; Windungsbreite: 13 mm (Gleichstrom- Widerstand: 10 Ohm)
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 130; Anzahl der Windungsschichten: 4 (Gleichstrom- Widerstand: 8 Ohm)
Erregerfrequenz:	800 kHz
Primärwicklungs- impedanz:	400 Ohm
Eisenkern -	Durchmesser: 2,2 mm; Länge: 10 mm
Proportionsbereich:	± 2 mm
maximaler Ausgangs- wert:	0,3 V

Bei den Beispielen 7 und 8 wurde der Durchmesser der Spule, um den die Wicklungen gewunden sind, noch weiter reduziert. Der Hub wurde ebenfalls verkürzt, und zwar auf $\pm 1,5$ mm. Bei Beispiel 7 wurde die Primärwicklung in einer Schicht gewickelt, während sie bei Beispiel 8 in zwei Schichten gewickelt wurde. Aufgrund der geringen Anzahl von Windungen wurden hohe Frequenzen verwendet.

B e i s p i e l 7

Kunststoffspule -	Außendurchmesser: 3 mm; Innendurchmesser: 2,2 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 160; Anzahl der Windungsschichten: 2; Windungsbreite: 11 mm (Gleichstrom- Widerstand: 8 Ohm)

Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 140; Anzahl der
Windungsschichten: 6 (Gleichstrom-
Widerstand: 8 Ohm)

Erregerfrequenz: 800 kHz

Primärwicklungs-
impedanz: 280 Ohm

Eisenkern - Durchmesser: 2 mm; Länge: 9 mm

Proportionsbereich: $\pm 1,5$ mm

maximaler Ausgangs-
wert: 1,0 bis 1,5 V

B e i s p i e l 8

Kunststoffspule - Außendurchmesser: 3 mm;
Innendurchmesser: 2,2 mm

Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 80; Anzahl der
Windungsschichten: 1 ;
Windungsbreite: 11 mm (Gleichstrom-
Widerstand: 5 Ohm)

Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 110; Anzahl der
Windungsschichten: 4 (Gleichstrom-
Widerstand: ca. 6 Ohm)

Erregerfrequenz: 1,2 MHz

Primärwicklungs-
impedanz: 400 Ohm

Eisenkern - Durchmesser: 2 mm; Länge: 9 mm

Proportionsbereich: $\pm 1,5$ mm

maximaler Ausgangs-
wert: 1,4 V

Die Beispiele 9 und 10 zeigen sehr kleine Differentialtrans-
formatoren, deren Spulen einen besonders kleinen Durchmesser
aufweisen. Bei beiden Beispielen blieben der Hub

und die Windungsbreite der Primärwicklung unverändert. Bei Beispiel 9 wurde die Primärwicklung jedoch in zwei Schichten gewickelt, während diese bei Beispiel 10 in einer Schicht gewickelt wurde.

B e i s p i e l 9

Aluminiumspule -	Außendurchmesser: 2,2 mm; Innendurchmesser: 1,6 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 350; Anzahl der Windungsschichten: 2; Windungsbreite: 22 mm (Gleichstrom- Widerstand: 8 Ohm)
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 270; Anzahl der Windungsschichten: 4 (Gleichstrom- Widerstand: 7 Ohm)
Erregerfrequenz:	800 kHz
Primärwicklungs- impedanz:	220 Ohm
Eisenkern -	Durchmesser: 1,4 mm; Länge: 18 mm
Proportions- bereich:	± 5 mm
maximaler Ausgangs- wert:	0,75 V

B e i s p i e l 10

Aluminiumspule -	Außendurchmesser: 2,2 mm; Innendurchmesser: 1,6 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 180; Anzahl der Windungsschichten: 1 ; Windungsbreite: 22 mm (Gleichstrom- Widerstand: 5 Ohm)
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 270; Anzahl der Windungsschichten: 4 (Gleichstrom- Widerstand: 7 Ohm)

Erregerfrequenz : 1 MHz
Primärwicklungs-
impedanz : 40 Ohm
Eisenkern - Durchmesser: 1,4 mm; Länge: 18 mm
Proportions-
bereich : ± 5 mm
maximaler Ausgangs-
wert: 0,8 bis 1 V

Die herkömmlichen Differentialtransformatoren weisen einen Kern auf, dessen Durchmesser 5 bis 8 mm beträgt, und der derart angeordnet ist, daß er sich während eines Meßvorgangs bewegt. Außerdem weist der herkömmliche Differentialtransformator ein Gehäuse auf, dessen Außendurchmesser 20 bis 40 mm beträgt. Daher haben derartige Differentialtransformatoren den Nachteil, daß sie ein großes Gewicht aufweisen. Andererseits weisen sie jedoch den Vorteil großer mechanischer Festigkeit auf. Die Beispiele 11 und 12 zeigen Ausführungsbeispiele der Erfindung, wobei kleinere Wicklungsdurchmesser als bei den herkömmlichen Differentialtransformatoren verwendet werden, während jedoch die bei Verwendung der herkömmlichen großen Kerne auftretende ausgezeichnete mechanische Festigkeit beibehalten wird.

Da der vergrößerte Wicklungsdurchmesser nahe bei 10 mm lag, erhöhte sich die Wicklungsinduktanz und somit wurde der Wert der Erregerfrequenz niedriger. Da die Primärwicklung in zwei Schichten gewickelt war, erwies sich eine Frequenz zwischen ca. 100 und 50 kHz für eine derartige Primärwicklung als günstig.

Da außerdem der Außendurchmesser der Wicklung nicht größer war als 11 mm, konnte der Außendurchmesser des Gehäuses innerhalb von 13 mm oder ungefähr auf der Hälfte des Außendurchmessers des herkömmlichen Differentialtransformator-Gehäuses gehalten werden, selbst wenn ein Gehäuse von 1 mm Dicke verwendet wurde.

Beispiel 11

Kunststoffspule - Außendurchmesser: 9 mm;
Innendurchmesser: 7 mm

Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 550; Anzahl der
Windungsschichten: 2;
Windungsbreite: 35 mm (Gleichstrom-
Widerstand: 38 Ohm)

Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 450; Anzahl der
Windungsschichten: 4 (Gleichstrom-
Widerstand: 32 Ohm)

Erregerfrequenz: 80 kHz

Primärwicklungs-
impedanz: 600 Ohm

Eisenkern - Durchmesser: 6,5 mm; Länge: 25 mm

Proportions-
bereich: ± 10 mm

maximaler Ausgangs-
wert: 0,5 V

Beispiel 12

Kunststoffspule - Außendurchmesser: 9 mm;
Innendurchmesser: 7 mm

Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 1020; Anzahl der
Windungsschichten: 2;
Windungsbreite: 65 mm (Gleichstrom-
Widerstand: 70 Ohm)

Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 900; Anzahl der
Windungsschichten: 4 (Gleichstrom-
Widerstand: 65 Ohm)

Erregerfrequenz: 60 bis 50 kHz

Eisenkern - Durchmesser: 6,5 mm; Länge: 50 mm;

Proportionsbereich: ± 25 mm

maximaler Ausgangs-
wert:

1,0 V bei einer Frequenz von 60 kHz und
0,9 V bei einer Frequenz von 50 kHz

Primärwicklungs-
impedanz :

700 Ohm bei 60 kHz und 540 Ohm bei 50 kHz

Zweite Ausführungsform

Fig. 8 zeigt ein Vibrometer, bei dem ein Differentialtransformator gemäß der zweiten Ausführungsform der Erfindung verwendet ist. Bei dem gezeigten Vibrometer ist ein röhrenförmiger Körper 31 aus einem nichtmagnetischen Material, wie Kunststoffmaterial oder nichtrostendem Stahl, hergestellt. Das Innere des röhrenförmigen Körpers 31 ist unter dichtem Verschluss mit einem Fluid 32, wie Silikonöl oder Luft, gefüllt. Eine bestimmte Masse eines Vibrationskörpers 33, der aus einem magnetischen Material, wie Eisen, hergestellt ist, ist von dem röhrenförmigen Körper 32 mittels Federn 35 und 36 getragen. Der Vibrationskörper 33 ist mit einer geeigneten Anzahl von Löchern 34 versehen, um die Vibration des Vibrationskörpers 32 auf ein geeignetes Maß zu dämpfen, welches durch Wahl der Größe und der Anzahl der Löcher veränderbar ist. Der so von den Federn 35 und 36 getragene Vibrationskörper 33 vibriert innerhalb des röhrenförmigen Körpers 31 in axialer Richtung desselben. Die natürliche Schwingungsfrequenz des Vibrationskörpers wird in der gleichen Weise wie beim herkömmlichen Vibrometer aufgrund der Verhältnisse der Federkonstante der Federn 35 und 36 zu der Masse des Vibrationskörpers auf einen geeigneten Wert eingestellt.

Der röhrenförmige Körper 31 weist eine Primärwicklung 37 auf, die in einer oder zwei Schichten um dessen äußeren Umfang gewickelt ist. Die Primärwicklung 37 ist mit Leitungsdrähten 38 versehen. Zwei Sekundärwicklungen 39 und 40 sind direkt über die Primärwicklung 37 in der vorbestimmten Anzahl

von Windungen gewickelt, wobei jeweils von der Mitte der Primärwicklung ausgegangen wird, und eine der Sekundärwicklungen die linke Seite und die andere die rechte Seite der Primärwicklung bedecken. Diese Sekundärwicklungen 39 und 40 sind mit Leitungsdrähten 41 bzw. 42 versehen. Die Primärwicklung 37, die Sekundärwicklungen 39 und 40 sowie der Vibrationskörper 33 bilden zusammen einen Differentialtransformator. Zur Erregung der Primärwicklung 37 wird eine Wechselspannung hoher Frequenz zwischen 50 und 2000 kHz auf diese aufgeprägt, um somit einen Wechselstrom von einigen Milliampère durch diese fließen zu lassen. Eine zur Messung der Lageveränderung des Vibrationskörpers 32 erforderliche Schaltungsanordnung ist der in Fig. 7 gezeigten ähnlich. Die Spannungen, die der Lageveränderung des Vibrationskörpers 33 entsprechen, werden in den Sekundärwicklungen 39 und 40 induziert. Die so erhaltenen Spannungen werden mittels Gleichrichterschaltungen gleichgerichtet und geglättet. Danach wird die Differenz zwischen den beiden Spannungen als Gleichstrom-Ausgangssignal abgenommen.

Bei Verursachung einer Schwingbewegung des röhrenförmigen Körpers 31 nach oben und unten schwingt der von den Federn 35 und 36 getragene Vibrationskörper 33 selbstverständlich ebenfalls nach oben und unten. Dann wird, wie bereits erwähnt, die durch die Vibration verursachte Lageveränderung des Vibrationskörpers 33 elektrisch gemessen, um somit die auf den röhrenförmigen Körper 31 übertragenen, nach oben und unten gehenden Vibrationsbedingungen festzustellen.

Das vorstehend beschriebene Ausführungsbeispiel weist einen einzigartigen strukturellen Aufbau auf, bei dem ein Fluid fest in den röhrenförmigen Körper eingeschlossen ist. Es ist jedoch selbstverständlich auch möglich, einen röhrenförmigen Körper und ein Gehäuse in der gleichen Weise wie beim herkömmlichen Vibrometer gemäß Fig. 6 separat anzu-

ordnen und die Primär- und Sekundärwicklungen dann gemäß der Erfindung zu wickeln.

Im allgemeinen sind Vibrometer des Lageveränderungs-Typs dazu ausgelegt, eine Vibration mit einem Amplitudenwert zu messen, der in den meisten Fällen ± 10 mm nicht übersteigt. In Anwendungsfällen, in denen diese als Stoß-Meßgeräte zur Messung einer Beschleunigung verwendet werden, nimmt der Wert der Meßamplitude weiter ab und übersteigt im allgemeinen ± 2 mm nicht. Die Größe der Vibrometer ändert sich somit je nach Verwendungszweck, für den sie bestimmt sind. Weist das Vibrometer jedoch einen großen Durchmesser auf und ist es für die Messung einer langen Amplitude ausgelegt, bekommt die um einen röhrenförmigen Körper gewickelte Primärwicklung einen großen Durchmesser sowie eine große Wicklungsbreite. Da die Windungsanzahl der Wicklung in diesem Fall zunimmt, führt die Verwendung einer ausgesprochen hohen Erregungsfrequenz zu einem überaus hohen Wert des induktiven Blindwiderstands der Primärwicklung. In einem derartigen Fall ist die Erregerfrequenz somit bevorzugterweise relativ niedrig zu wählen. Umgekehrt ist die Verwendung einer relativ hohen Erregerfrequenz vorteilhaft, wenn das Vibrometer für die Messung einer kurzen Amplitude verwendet werden soll.

Versuche, die an Vibrometern mit röhrenförmigen Körpern von 10 mm, 8 mm oder 4 mm Außendurchmesser durchgeführt wurden, haben folgende Ergebnisse gezeigt (genaue Beschreibung folgt noch): Die verwendbare Erregerfrequenz liegt zwischen 50 und 200 kHz für einen röhrenförmigen Körper mit 10 mm Außendurchmesser, zwischen 300 und 500 kHz für einen röhrenförmigen Körper von 8 mm Außendurchmesser und zwischen 800 und 2000 kHz für einen röhrenförmigen Körper von 4 mm Außendurchmesser.

Weiter haben die Ergebnisse der Versuche gezeigt, daß die Verwendung einer Erregerfrequenz von über 2 MHz

aufgrund der Kapazität zwischen nebeneinanderliegenden Strängen der Wicklung ein Ansteigen des Skin- bzw. Oberflächenstroms verursacht, der an der Oberfläche der Wicklung fließt. Dies wiederum verursacht eine Verringerung des für die Erzeugung der magnetischen Kraftlinien wirksamen Stroms. Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, daß die obere Grenze für die verwendbare Erregerfrequenz bei 2 MHz liegt.

Der zweite Gesichtspunkt der Erfindung wird aufgrund der folgenden praktischen Beispiele noch näher veranschaulicht, wobei: die Beispiele 1 und 2 den strukturellen Aufbau gemäß Fig. 7 aufweisen; die Beispiele 3 und 6 den strukturellen Aufbau gemäß Fig. 6 aufweisen, wobei die Wicklungen gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren gewickelt sind. Diese Beispiele beziehen sich auf Experimente, bei denen der Außendurchmesser sowie der Innendurchmesser des röhrenförmigen Körpers, die Anzahl der Windungen, die Anzahl der Windungsschichten, die Windungsbreite sowie die Erregerfrequenz der Primärwicklung, die Anzahl der Windungen sowie die Anzahl der Windungsschichten der Sekundärwicklungen, sowie der Durchmesser und die Länge des aus Eisen bestehenden Vibrationskörpers verändert wurden. Bei jedem Beispiel ist ein Transformatordraht von 0,10 mm Durchmesser in einer bestimmten Anzahl von Windungen und auf eine bestimmte Windungsbreite zur Bildung der Primärwicklung um den röhrenförmigen Körper gewickelt. Die beiden Sekundärwicklungen wurden dadurch geschaffen, daß Transformatordrähte des gleichen Durchmessers direkt über die Primärwicklung gewickelt wurden, wobei von der Mitte der Primärwicklung ausgegangen wurde und in Richtung auf das eine Ende derselben für die eine der Sekundärwicklungen und in Richtung auf das andere Ende derselben für die andere Sekundärwicklung in einer bestimmten Anzahl von Windungen und Schichten gewickelt wurde. In den röhrenförmigen Körper wurde ein Vibrationskörper aus Eisen eingesetzt, der einen bestimmten Durchmesser und eine bestimmte Länge aufwies. Bei derart aufgebauten erfindungsgemäßen Vibrometer-Differentialtransformatoren wurde die Primärwicklung jedes Vibrometers mit

- 43 - 47

einem Wechselstrom von 1 V und von Sinuswellenform bei einer bestimmten Frequenz erregt. Dann hat es sich bestätigt, daß die Lageveränderung jedes Vibrationskörpers innerhalb des bestimmten Proportionsbereichs (einer zur Messung verwendeten Länge) im wesentlichen in geeigneter Proportion zur Ausgangs-Gleichstrom-Spannung liegt. Die Gleichstrom- Ausgangsspannung wurde aus der Differenz zwischen zwei gleichgerichteten und geglätteten Strömen der beiden Sekundärwicklungen erhalten. Es hat sich weiter bestätigt, daß die Ansprechfrequenz der Ausgangsspannung ungefähr ein Zehntel der Erregerfrequenz betrug.

Die Beispiele 1 und 2 stellen Fälle dar, in denen der Vibrationskörper einen großen Durchmesser (6,5 mm) aufwies, was somit zu einem großen Durchmesser des röhrenförmigen Körpers von 10 mm führte. Die Erregerfrequenz war in diesen Fällen niedrig. In Beispiel 2 war jedoch die Erregerfrequenz höher als bei Beispiel 1, da die Primärwicklung in Beispiel 2 in einer Schicht gewickelt war und somit eine geringere Anzahl von Windungen aufwies.

B e i s p i e l 1

Röhrenförmiger Körper aus
Kunststoff -

Außendurchmesser: 10 mm;
Innendurchmesser: 7,5 mm

Primärwicklung -

Anzahl der Windungen: 300; Anzahl
der Windungsschichten: 2;
Windungsbreite: 20 mm (Gleichstrom-
Widerstand: 27 Ohm)

Sekundärwicklungen -

Anzahl der Windungen: 310; Anzahl
der Windungsschichten: 6 (Gleich-
strom-Widerstand: 29 Ohm)

Vibrationskörper -

Durchmesser: 6,5 mm; Länge: 15 mm

Erregerfrequenz:

50 kHz, 100 kHz

Proportionsbereich:

± 8 mm

- 49 - 48.

maximaler Ausgangswert: 0,3 V (sowohl bei 50 als auch bei 100 kHz)
 Primärwicklungs-Impedanz: 260 Ohm bei 50 kHz und 400 Ohm bei 100 kHz
 Ansprechfrequenz: 5 kHz bei einer Erregerfrequenz von 50 kHz
 10 kHz bei einer Erregerfrequenz von 100 kHz

B e i s p i e l 2

Röhrenförmiger Körper aus Kunststoff - Außendurchmesser: 10 mm; Innendurchmesser: 7,5 mm
 Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 160; Anzahl der Windungsschichten: 1; Windungsbreite: 20 mm (Gleichstrom-Widerstand: 14 Ohm)
 Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 220; Anzahl der Windungsschichten: 4 (Gleichstrom-Widerstand: 20 Ohm)
 Vibrationskörper - Durchmesser: 6,5 mm; Länge: 15 mm
 Erregerfrequenz: 200 kHz
 Proportionsbereich: ± 8 mm
 maximaler Ausgangswert: 0,5 V
 Primärwicklungs-Impedanz: 200 Ohm
 Ansprechfrequenz: 20 kHz

Bei den folgenden Beispielen 3 und 4 wurden röhrenförmige Körper von jeweils 8 mm Außendurchmesser verwendet. Bei Beispiel 3 betrug die Windungsbreite der Primärwicklung wegen eines langen Proportionsbereichs, d.h., der für die Messung zu verwendenden Länge, 15 mm. In Beispiel 4 hingegen betrug die Windungsbreite der Primärwicklung wegen eines kürzeren

Proportionsbereichs nur 10 mm. Bei Beispiel 4, in dem die Windungsanzahl der Wicklung geringer war als bei Beispiel 3, wurde eine höhere Erregerfrequenz verwendet.

B e i s p i e l 3

Röhrenförmiger Körper aus Kunststoff -	Außendurchmesser: 8 mm; Innendurchmesser: 6,5 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 125; Anzahl der Windungsschichten: 1; Windungsbreite: 15 mm (Gleichstrom- Widerstand: 13 Ohm)
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 180; Anzahl der Windungsschichten: 4 (Gleich- strom-Widerstand: 15 Ohm)
Vibrationskörper -	Durchmesser: 5,5 mm; Länge: 12 mm
Erregerfrequenz:	300 kHz
Proportionsbereich:	± 6 mm
maximaler Ausgangswert:	0,35 V
Primärwicklungs-Impedanz:	125 Ohm
Ansprechfrequenz:	30 kHz

B e i s p i e l 4

Röhrenförmiger Körper aus Kunststoff -	Außendurchmesser: 8 mm; Innendurchmesser: 6,5 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 90; Anzahl der Windungsschichten: 1; Windungsbreite: 10 mm (Gleichstrom- Widerstand: 12 Ohm)
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 80; Anzahl der Windungsschichten: 4 (Gleich- strom-Widerstand: 10 Ohm)

- 48 - 50

Vibrationskörper -	Durchmesser: 5,5 mm; Länge: 8 mm
Erregerfrequenz:	500 kHz
Proportionsbereich:	± 3 mm
maximaler Ausgangswert:	0,18 V
Primärwicklungs-Impedanz:	135 Ohm
Ansprechfrequenz:	50 kHz

Bei den folgenden Beispielen 5 und 6 wurden röhrenförmige Körper mit einem Außendurchmesser von 4 mm verwendet. Bei jedem dieser Beispiele war der Wicklungsdurchmesser klein und die Anzahl der Windungen ebenfalls gering. Aus diesem Grund wurde eine hohe Erregerfrequenz verwendet.

B e i s p i e l 5

Röhrenförmiger Körper aus Kunststoff -	Außendurchmesser: 4 mm; Innendurchmesser: 2,4 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 200; Anzahl der Windungsschichten: 2; Windungsbreite: 13 mm (Gleichstrom- Widerstand: 10 Ohm)
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 130; Anzahl der Windungsschichten: 4 (Gleich- strom-Widerstand: 8 Ohm)
Vibrationskörper -	Durchmesser: 2,2 mm; Länge: 10 mm
Erregerfrequenz:	800 kHz
Proportionsbereich:	± 2 mm
maximaler Ausgangswert:	0,3 V
Primärwicklungs-Impedanz:	400 Ohm
Ansprechfrequenz:	80 kHz

- 47 - 51.

B e i s p i e l 6

Röhrenförmiger Körper aus Kunststoff -	Außendurchmesser: 4 mm; Innendurchmesser: 2,4 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 180; Anzahl der Windungsschichten: 1; Windungsbreite: 20 mm (Gleichstrom- Widerstand: 9 Ohm)
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 130; Anzahl der Windungsschichten: 2 (Gleich- strom-Widerstand: 7 Ohm)
Vibrationskörper -	Durchmesser: 2,2 mm; Länge: 15 mm
Erregerfrequenz:	1 MHz und 2 MHz
Proportionsbereich:	± 5 mm
maximaler Ausgangswert:	bei einer Erregerfrequenz von 1 MHz: 0,3 V bei einer Erregerfrequenz von 2 MHz: 0,3 V
Primärwicklungs-Impedanz:	260 Ohm bei 1 MHz und 820 Ohm bei 2 MHz
Ansprechfrequenz:	100 kHz bei 1 MHz und 200 kHz bei 2 MHz

Dritte Ausführungsform

Die Fig. 9 bis 19 zeigen eine dritte Ausführungsform der Erfindung, bei dem ein dritter Gesichtspunkt der Erfindung betont ist. Bei dem in Fig. 9 in einer Schnittdarstellung gezeigten Ausführungsbeispiel handelt es sich um einen Differentialtransformatoren mit einer Primärwicklung 16 und Sekundärwicklungen 18 und 19, die um eine Spule 11 gewickelt sind. Die Verbindungen dieser Teile sind so wie in Fig. 11 dargestellt angeordnet.

Die aus einem nichtmagnetischen Kunststoffmaterial bestehende Spule 11 weist zwei Nuten der gleichen Abmessung auf, die zum Winden der Wicklungen dienen. Die Spule 11 weist weiterhin einen axialen Schlitz 15 zur Führung der Leitungsdrähte der Wicklungen auf. Die Primärwicklung 16 ist in fortlaufender Weise in einer oder zwei Schichten auf die Böden der vorgenannten Nuten 13 und 14 der Spule 11 gewickelt. In der Nut 13 ist eine Sekundärwicklung 18 direkt über die Primärwicklung in einer vorbestimmten Anzahl von Windungen gewickelt. In der anderen Nut 14 ist die andere Sekundärwicklung 19 ebenfalls direkt über die Primärwicklung in einer vorbestimmten Anzahl von Windungen gewickelt. Die Spule 11 weist einen Hohlraum 12 auf. Ein Kern 22 aus einem leitenden Metall niedriger Permeabilität ist so angeordnet, daß er innerhalb des Hohlraums 12 der Spule 11 bewegbar ist. Der Kern 22 ist von einem Stützstab 23 aus Kunststoff getragen, derart, daß er in axialer Richtung des Lochs bzw. Hohlraums 12 bewegbar ist. Die Primärwicklung ist mit Leitungsdrähten 17 versehen und die Sekundärwicklungen 18 und 19 sind mit Leitungsdrähten 20 bzw. 21 versehen. Die beiden Enden der Leitungsdrähte 17 der Primärwicklung sind so angeordnet, daß eine Wechselspannung hoher Frequenz auf diese aufprügbar ist.

Bei dem vorstehend beschriebenen strukturellen Aufbau werden Spannungen mittels der durch die Primärwicklung 16 erzeugten magnetischen Kraftlinien in den beiden Sekundärwicklungen 18 und 19 induziert, die direkt über die Primärwicklung gewickelt sind. Wenn sich der Kern 22 in der Mitte zwischen den beiden Sekundärwicklungen 18 und 19 befindet, sind die in diesen Sekundärwicklungen induzierten Spannungen einander gleich. Somit ist die Spannung zwischen den Leitungsdrähten 20 und 21 gleich null. Bewegt sich der Kern 22 nach links, gesehen in bezug auf die Darstellung gemäß Fig. 9, nimmt die in der Sekundärwicklung 18 induzierte Spannung ab, während die in der anderen Sekundärwicklung 19 induzierte Spannung zunimmt. Dann wird

eine Spannungsdifferenz zwischen den beiden Spannungen zwischen den Leitungsdrähten 20 und 21 erzeugt. Umgekehrt verursacht die Bewegung des Kerns nach rechts ein Ansteigen der Spannung der Sekundärwicklung 18 und eine Abnahme der Spannung der Sekundärwicklung 19. Eine Spannung, die die Differenz zwischen den beiden Spannungen darstellt, erscheint dann ebenfalls zwischen den Leitungsdrähten.

Fig. 12 zeigt das Verhältnis der zwischen den Leitungsdrähten erzeugten Spannung zu der Lageveränderung des Kerns. Die Lageveränderung des Kerns 22 ist an der Abszisse dargestellt und die Ausgangsspannung an der Ordinate. In der gleichen Weise wie beim herkömmlichen Differentialtransformator stellt sich ein Verhältnis in Form des Buchstabens V ein, wie in Fig. 12 dargestellt.

Eine Modifizierung des oben in bezug auf Fig. 9 beschriebenen Differentialtransformators ist in Fig. 13 dargestellt. Bei diesem Modifizierungsbeispiel ist der bei Fig. 9 verwendete Kern durch ein hohles Gehäuse 24 ersetzt, das auf dem äußeren Umfang der Spule 11 in axialer Richtung derselben bewegbar ist. Dieses Gehäuse 24 besteht aus einem leitenden Metallmaterial niedriger Permeabilität und ist von einem Stützrohr 25 aus Kunststoffmaterial getragen. Die Arbeitsweise dieser Modifizierung ist der des vorstehend beschriebenen dritten Ausführungsbeispiels ähnlich. Diese Modifizierung ist dort anwendbar, wo der bewegliche Teil außerhalb der Wicklungsanordnung liegen muß.

Weitere Modifizierungsbeispiele sind in den Fig. 14, 16 und 18 gezeigt. Der Zweck dieser Modifizierungen ist folgender: Wenn ein dem Kern entsprechendes Element aus einem ferromagnetischen Material hoher Permeabilität in der gleichen Weise wie bei herkömmlichen Transformatoren hergestellt wird, ist es schwierig, einen Differentialtransformator herzu-

stellen, der in der Lage ist, die Ausgangsspannung in einem genau proportionalen Verhältnis zur Lageveränderung des Kerns zu halten. Zur Lösung dieses Problems ist jeder der in den Fig. 14, 16 und 18 gezeigten Transformatoren erfindungsgemäß hergestellt, und zwar durch Verwendung eines leitenden Metallmaterials niedriger Permeabilität für das dem Kern entsprechende Element und durch derartiges Anordnen der Primärwicklung, daß ein Erregerstrom hoher Frequenz auf diese aufprägbare ist. Diese Anordnung ermöglicht es dem Differentialtransformator, die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung in einem genau proportionalen Verhältnis zueinander zu halten.

Bei Fig. 14 sind zwei Primärwicklungs-Bereiche 31 und 32 um zwei zylindrische, röhrenförmige Spulen 29 und 30 gewickelt. Danach sind zwei Sekundärwicklungen 34 und 36 direkt über die Primärwicklungs-Bereiche 31 und 32 gewickelt. Die Leitungsdrähte dieser Primärwicklung sind in Reihe geschaltet, während die der Sekundärwicklungen wie in Fig. 15 dargestellt differenzmäßig miteinander verbunden sind, wobei das Bezugszeichen 33 den Leitungsdraht der Primärwicklung bezeichnet und die Bezugszeichen 35 und 37 die Leitungsdrähte der Sekundärwicklungen bezeichnen. Ein scheibenförmiger Kern 38 ist aus einem leitenden Metallmaterial niedriger Permeabilität, wie Aluminium, gebildet und von einem Stützstab 39 aus Kunststoffmaterial getragen und außerdem derart angeordnet, daß er nach rechts und links in axialer Richtung des Stützstabes 39 bewegbar ist.

Bei Bewegung des scheibenförmigen Kerns 38 in Richtung auf die Stirnflächen der Wicklungen sowie von diesen weg verändern sich nur die an den Stirnflächen der Wicklungen auftretenden magnetischen Kraftlinien. Da die in den Sekundärwicklungen induzierten Spannungen in dieser Weise zur Erzielung einer Ausgangsspannung verändert werden, weist dieser

Transformator den Nachteil auf, daß die Ausgangsspannung gering ist. Andererseits kann der Transformator jedoch dort vorteilhaft verwendet werden, wo der Hub sehr kurz sein muß, da die Bewegung des Kerns des Transformators auf einen sehr engen Bereich begrenzt werden kann.

Fig. 16 zeigt eine weitere Modifikation des in Fig. 14 dargestellten Differentialtransformators. Dabei ist der Kern in zwei Teile unterteilt. Der Transformator arbeitet nach genau denselben Prinzipien wie der in Fig. 14 dargestellte. Die Bewegung der Kerne näher an die Stirnflächen der Wicklungen heran und von diesen weg verursacht Änderungen der in den Sekundärwicklungen induzierten Spannungen. Dadurch läßt sich eine Ausgangsspannung proportional zur Lageveränderung der Kerne erreichen. In den beiden Endbereichen einer Spule 40 von zylindrischer Rohrform sind zwei Nuten vorgesehen. Primärwicklungs-Bereiche 41 und 42 sind auf den Böden der beiden Nuten gewickelt. Zwei Sekundärwicklungen 43 und 44 sind dann direkt über die Primärwicklungs-Bereiche 41 und 42 gewickelt. Wie in Fig. 17 dargestellt, sind die Leitungsdrähte 45 der Primärwicklung in Reihe geschaltet, während die Leitungsdrähte 46 und 47 der Sekundärwicklungen differenzmäßig miteinander verbunden sind. Scheibenförmige Kerne 48 und 49 sind aus einem leitenden Metallmaterial niedriger Permeabilität, wie Aluminium, hergestellt und von einem Stützstab 50 aus Kunststoffmaterial getragen. Die scheibenförmigen Kerne 48 und 50 sind in axialer Richtung der Stützstange 50 bewegbar.

Der Differentialtransformator gemäß Fig. 16 kann dadurch zu einem Detektor für berührungsfreies Messen modifiziert werden, daß die den Kern stützende Stange 50 entfernt wird und einer der Kerne unbewegbar an der Spule anliegt und der andere Kern allein bewegbar bleibt. Diese Modifikation kann wie in Fig. 18 dargestellt ausgebildet sein. Dabei ist ein Kern 51, der dem Kern 48 der Fig. 16 entspricht, in engem Kontakt mit

der Spule 40 angeordnet. Ein dem Kern 49 entsprechender Kern 52 wird an einem zu messenden Gegenstand angebracht. Wenn der Kern 52 auch mit der Spule 40 in Berührung kommt, erzeugen die Kerne 51 und 52 gleiche Auswirkungen auf die Primärwicklungs-Bereiche. Dann sind die in den Sekundärwicklungen induzierten Spannungen ebenfalls einander gleich und ergeben eine Ausgangsspannung von null. Wenn sich der Kern 52 jedoch von der Spule 40 wegbewegt, entsteht eine Differenz zwischen den induzierten Spannungen der beiden Sekundärwicklungen, die proportional zu dem Ausmaß ist, in dem sich der Kern 52 von der Spule wegbewegt hat. Dies ermöglicht somit, die Entfernung zwischen dem Kern 52 und der Spule festzustellen. Das Verhältnis der somit auftretenden Lageveränderung zur Ausgangsspannung des Transformators oder Detektors ist wie in Fig. 19 dargestellt.

Bei dem Differentialtransformator gemäß Fig. 18 müssen die Kerne 51 und 52 adäquate Wirbelstromverluste der gleichen Art aufweisen. Diese Bedingung läßt sich dadurch erfüllen, daß diese Kerne 51 und 52 aus dem gleichen Material hergestellt werden. Der Kern 52 muß nicht die Form einer Scheibe aufweisen. Es kann sich zum Beispiel um einen Teil einer großen Struktur oder Maschine handeln, oder um eine sich bewegend flache Platte. In diesem Fall stellt die Ausgangsspannung des Differentialtransformators den Abstand zwischen dem Element und der Spule dar. Wenn man annimmt, daß man ein Produkt sich unter diesem Differentialtransformator vorbeibewegen läßt, läßt sich jede Änderung der Höhe des Produkts aufgrund der Ausgangsspannung des Differentialtransformators feststellen, die den Abstand zwischen der Spule und dem Produkt aufzeigt. Eine berührungsfreie Messung ist in verschiedenen Fällen erforderlich, z.B., wenn sich ein zu messender Gegenstand mit einer hohen Geschwindigkeit bewegt, der Gegenstand eine hohe Temperatur hat, der Gegenstand vibriert oder wenn der Gegenstand so weich ist, daß er nicht ohne Deformierung berührt werden kann. Der erfin-

- 57 - 57 -

dungsgemäße Differentialtransformator gemäß Fig. 18 ist für solche Anwendungen ausgesprochen vorteilhaft, da er den Gegenstand wie oben beschrieben in einer berührungsfreien Weise genau abmißt.

Erfindungsgemäß können die Lageveränderung und die Ausgangsspannung in einer geeigneten Proportion gehalten werden, da die Verwendung eines leitenden Metallmaterials für den Kern gewährleistet, daß die Verteilungssymmetrie der magnetischen Kraftlinien niemals durch die Lageveränderung des Kerns zerstört wird. Ein adäquat großer Wert des Wirbelstromverlustes wird in dem Kern erzeugt, da die Primärwicklung von einem Strom hoher Frequenz zu erregen ist. Auf diese Weise läßt sich eine hohe Ausgangsspannung erzielen. Im Hinblick auf die Differentialtransformatoren mit kurzem Hub und kleiner Spulenbreite läßt sich insbesondere ein Differentialtransformator, der in der Lage ist, die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung in einer angemessenen Proportion zu halten, erfindungsgemäß viel leichter herstellen als die Differentialtransformatoren, die Kerne aus ferromagnetischen Materialien verwenden.

Bei herkömmlichen Differentialtransformatoren bestand die Befürchtung, daß deren Kerne durch die in diesen erzeugte magnetische Anziehungskraft angezogen werden. Im Gegensatz dazu führt gemäß der Erfindung die Verwendung einer hohen Frequenz zu einer geringeren magnetischen Anziehung. Außerdem ist der Kern niedriger Permeabilität nicht für eine magnetische Kraft anfällig, und somit läßt sich die Gefahr einer Anziehung eliminieren. Aus diesem Grund ist der erfindungsgemäße Differentialtransformator für Anwendungen bei Präzisionsmessungen, die mit einem Kern niedrigen Gewichts, wie einem Aluminiumkern, durchzuführen sind, besonders vorteilhaft. Da die Ausgangsspannung des Differentialtransformators nach Gleichrichtung und Glättung in Form einer Gleichstromspannung vorliegt, beträgt die Ansprechfrequenz ca. ein

Zehntel der Erregerfrequenz. Da jedoch die Erregung mit einer hohen Frequenz durchgeführt wird, ist die erfindungsgemäß erzielbare Ansprechfrequenz ausreichend hoch, um die Messung einer sehr schnellen Bewegung zu ermöglichen.

Die folgenden Beispiele dienen zur Veranschaulichung besonderer Einzelheiten des Differentialtransformators gemäß dem dritten Gesichtspunkt der Erfindung. Unter diesen Beispielen stellen die Beispiele 1 bis 5 Differentialtransformatoren des in den Fig. 9 oder 13 gezeigten strukturellen Aufbaus dar. Beispiel 6 zeigt einen Transformator mit dem in Fig. 14 dargestellten strukturellen Aufbau und Beispiel 7 zeigt einen Transformator des in Fig. 18 dargestellten strukturellen Aufbaus.

Bei den nachstehenden Beispielen wurden der Innendurchmesser und der Außendurchmesser der Spule, die Breite der Nut, der Bodendurchmesser der Nut, die Anzahl der Windungen, die Anzahl der Schichten und die Windungsbreite der Primärwicklung, die Anzahl der Windungen und die Anzahl der Schichten der Sekundärwicklungen, die Erregerfrequenz und das Material, der Außendurchmesser, der Innendurchmesser und die Länge des Kerns oder des Gehäuses verändert. Die in diesen Beispielen verwendeten Differentialtransformatoren waren wie folgt aufgebaut: Die Spule wurde aus Kunststoffmaterial hergestellt. Der Abstand zwischen den beiden Nuten betrug 2 mm in den Beispielen 1 bis 5, 5 mm in Beispiel 6 und ca. 20 mm in Beispiel 7. Bei jedem Beispiel wurde die Primärwicklung dadurch geschaffen, daß ein Polyurethandraht von 0,10 mm Durchmesser fortlaufend in die beiden Nuten gewickelt wurde. Die Sekundärwicklungen wurden dadurch gebildet, daß separat Polyurethandrahte des gleichen Durchmessers direkt über die Primärwicklung gewickelt wurden. Die Primärwicklung wurde mit einer sinusförmigen Wechselspannung von 1 V erregt. Es hat sich dann bestätigt, daß die Lageveränderung

jedes Kerns oder Gehäuses im wesentlichen in einem korrekt proportionalen Verhältnis zur Ausgangsspannung lag.

Die Beispiele 1 und 2 zeigen Differentialtransformatoren des Hochfrequenz-Typs, wobei der Wicklungsdurchmesser 15 mm betrug. Eine ausreichend hohe Frequenz wurde zur Erzeugung hoher Ausgangsspannungen verwendet, was den Transformatorbetrieb problemlos macht.

Die Beispiele beinhalten Daten, die mittels Transformatoren mit Kernen oder Gehäusen aus Aluminium oder Messing ermittelt wurden. Bei Verwendung von Eisenkernen oder -gehäusen haben sich Ausgangsspannungen eingestellt, die ungefähr die Hälfte oder weniger der Ausgangsspannungen betrugten, die bei Verwendung von Aluminium- oder Messingkernen oder -gehäusen der gleichen Abmessungen erzielt wurden.

B e i s p i e l 1

Spule -	Außendurchmesser: 18 mm; Innendurchmesser: 13,2 mm Nutbreite: 5 mm Bodendurchmesser der Nut: 15 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 76; Anzahl der Windungsschichten: 1; Windungsbreite: 12 mm
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 100; Anzahl der Windungsschichten: 3;
verwendete Frequenz:	400 und 600 kHz
1) Aluminiumkern -	Außendurchmesser: 12,8 mm; Innendurchmesser: 8 mm; Länge: 7 mm ± 4 mm
Proportionsbereich: maximaler Ausgangs- wert:	1,1 V bei einer Frequenz von 400 kHz und 3,0 V bei einer Frequenz von 600 kHz

- 58 - 60.

- 2) Messingkern - Außendurchmesser: 12,8 mm;
Innendurchmesser: 8 mm; Länge: 7 mm
± 4 mm
Proportionsbereich:
maximaler Ausgangs-
wert 0,9 V bei einer Frequenz von 400 kHz
und 2,8 V bei einer Frequenz von
600 kHz
- 3) Aluminiumgehäuse - Außendurchmesser: 30 mm;
Innendurchmesser: 19 mm; Länge: 7 mm
± 4 mm
Proportionsbereich:
maximaler Ausgangs-
wert: 0,5 V bei einer Frequenz von 400 kHz
und 1,4 V bei einer Frequenz von
600 kHz
- 4) Messinggehäuse - Außendurchmesser: 30 mm;
Innendurchmesser: 19 mm; Länge: 7 mm
± 4 mm
Proportionsbereich:
maximaler Ausgangs-
wert: 0,5 V bei einer Frequenz von 400 kHz
und 1,4 V bei einer Frequenz von
600 kHz

B e i s p i e l 2

- Spule - Außendurchmesser: 18 mm;
Innendurchmesser: 13,2 mm;
Nuthbreite: 3 mm;
Bodendurchmesser der Nut: 15 mm
- Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 40; Anzahl
der Windungsschichten: 1;
Windungsbreite: 8 mm
- Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 63; Anzahl
der Windungsschichten: 4;
- verwendete Frequenz: 800 kHz und 1 MHz
- 1) Aluminiumkern - Außendurchmesser: 12,8 mm;
Innendurchmesser: 8 mm; Länge: 5 mm
± 2 mm
Proportionsbereich:

- 57 - 6A.

- | | |
|------------------------------|--|
| maximaler Ausgangs-
wert: | 3,5 V bei einer Frequenz von 800 kHz
und 0,5 V bei einer Frequenz von 1 MHz |
| 2) Messingkern - | Außendurchmesser: 12,8 mm;
Innendurchmesser: 8 mm; Länge: 5 mm |
| Proportionsbereich: | ± 2 mm |
| maximaler Ausgangs-
wert: | 3,5 V bei einer Frequenz von 800 kHz
und 0,5 V bei einer Frequenz von 1 MHz |
| 3) Aluminiumgehäuse - | Außendurchmesser: 30 mm;
Innendurchmesser: 19 mm; Länge: 5 mm |
| Proportionsbereich: | ± 2 mm |
| maximaler Ausgangs-
wert: | 1,2 V bei einer Frequenz von 800 kHz |
| 4) Messinggehäuse - | Außendurchmesser: 30 mm;
Innendurchmesser: 19 mm; Länge: 5 mm |
| Proportionsbereich: | ± 2 mm |
| maximaler Ausgangs-
wert: | 1,1 V bei einer verwendeten Frequenz
von 800 kHz |

Bei jedem der nachstehenden Beispielen 3, 4 und 5 wurde der Differentialtransformator dadurch gebildet, daß die Primärwicklung in einer oder zwei Schichten über die gesamte Länge einer Kunststoff-Spule von 10 mm Außendurchmesser, 6,5 mm Innendurchmesser und 8 mm Bodendurchmesser der Nut gewickelt wurde; danach wurden zwei Sekundärwicklungen direkt über die Primärwicklung in einer bestimmten Anzahl von Windungen gewickelt, und zwar ausgehend von der Mitte der Primärwicklung, wobei eine Sekundärwicklung nach links und die andere nach rechts gewickelt wurde. Der Wicklungsdurchmesser wurde reduziert und zur Erzielung eines längeren Meßbereichs (oder Hubs) wurde die Windungsbreite der Wicklung erhöht. Bei einem derartigen längeren Hub erhöht sich die Anzahl der Wicklungswindungen. Demgemäß wurde die verwendete Frequenz niedriger. Zusätzlich zu den Daten, die aus der Verwendung der Aluminium- und Messingkerne resultieren, werden zur Bezugnahme auch die

- 58 - 62.

Daten gezeigt, die aus der Verwendung von Eisenkernen resultieren. Die Werte der unter Verwendung von Eisenkernen erzielten maximalen Ausgangsspannungen waren ebenfalls niedriger als die Werte, die bei Verwendung von Aluminium- und Messingkernen erzielt wurden, und zwar selbst bei den Beispielen, bei denen niedrigere Frequenzwerte verwendet wurden.

B e i s p i e l 3

Spule -	Außendurchmesser: 10 mm; Innendurchmesser: 6,5 mm; Nutbreite: 7 mm; Bodendurchmesser der Nut: 8 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 260; Anzahl der Windungsschichten: 2; Windungsbreite: 16 mm
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 190; Anzahl der Windungsschichten: 4;
verwendete Frequenz:	100 kHz
1) Aluminiumkern -	Außendurchmesser: 6,3 mm runder Stab Länge: 13 mm; Proportionsbereich: ± 5 mm maximaler Ausgangswert: 0,4 V
2) Messingkern -	Außendurchmesser: 6,3 mm runder Stab Länge: 13 mm; Proportionsbereich: ± 5 mm maximaler Ausgangswert: 0,4 V
3) Eisenkern -	Außendurchmesser: 6,3 mm runder Stab Länge: 13 mm; Proportionsbereich: ± 5 mm maximaler Ausgangswert: 0,25 V

B e i s p i e l 4

Spule -	Außendurchmesser: 10 mm; Innendurchmesser: 6,5 mm; Nutbreite: 14 mm; Bodendurchmesser der Nut: 8 mm;
---------	---

Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 500; Anzahl der Windungsschichten: 2; Windungsbreite: 30 mm
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 370; Anzahl der Windungsschichten: 4;
verwendete Frequenz:	50 kHz und 100 kHz
1) Aluminiumkern -	Außendurchmesser: 6,3 mm runder Stab Länge: 25 mm ± 10 mm
Proportionsbereich: maximaler Ausgangs- wert:	0,4 V bei einer Frequenz von 50 kHz und 0,6 V bei einer Frequenz von 100 kHz
2) Messingkern -	Außendurchmesser: 6,3 mm runder Stab Länge: 25 mm ± 10 mm
Proportionsbereich: maximaler Ausgangs- wert:	0,4 V bei einer Frequenz von 50 kHz und 0,6 V bei einer Frequenz von 100 kHz
3) Eisenkern -	Außendurchmesser: 6,3 mm runder Stab Länge: 25 mm ± 10 mm
Proportionsbereich: maximaler Ausgangs- wert:	0,35 V bei einer Frequenz von 50 kHz und 0,5 V bei einer Frequenz von 100 kHz.

Beispiel 5

Die Anzahl der Windungen der Primärwicklung war die gleiche wie bei Beispiel 4. Die Anzahl der Windungen pro Längeneinheit betrug jedoch nur die Hälfte der von Beispiel 4, da die Windungsbreite ungefähr doppelt so lang war wie bei Beispiel 4. Demgemäß war die verwendete Frequenz höher.

- 60 - 64.

Spule -	Außendurchmesser: 10 mm; Innendurchmesser: 6,5 mm; Nutbreite: 29 mm; Bodendurchmesser der Nut: 8 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 500; Anzahl der Windungsschichten: 1; Windungsbreite: 60 mm
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 400; Anzahl der Windungsschichten: 2;
verwendete Frequenz:	200 kHz
1) Aluminiumkern -	Außendurchmesser: 6,3 mm runder Stab Länge: 50 mm ± 20 mm
Proportionsbereich: maximaler Ausgangs- wert:	1,0 V
2) Messingkern -	Außendurchmesser: 6,3 mm runder Stab Länge: 50 mm ± 20 mm
Proportionsbereich: maximaler Ausgangs- wert:	0,9 V
3) Eisenkern	Außendurchmesser: 6,3 mm runder Stab Länge: 50 mm ± 20 mm
Proportionsbereich: maximaler Ausgangs- wert:	0,6 V

B e i s p i e l 6

Beispiel 6 bezieht sich auf einen Differentialtransformator, der die magnetischen Kraftlinien der Stirnflächen der Wicklung - wie in Fig. 14 dargestellt - verwendet. Zwei Nuten mit einer Breite von 3 mm und einem Bodendurchmesser von 10 mm waren in den zylindrischen röhrenförmigen Spulen aus Kunststoffmaterial vorgesehen. Die Primärwicklung wurde auf die Böden der Nuten gewickelt. Danach wurden die Sekundär-

wicklungen direkt über die Primärwicklung gewickelt. Der Transformator diente zur Messung der Lageveränderung eines scheibenförmigen Kerns aus Aluminium, wobei der Meßbereich auf ± 1 mm festgesetzt war.

Primärwicklung:	in 35 Windungen in 2 Schichten auf den Boden jeder der in der linken und der rechten Spule vorgesehenen Nut gewickelt
Sekundärwicklungen:	in 60 Windungen in 4 Schichten in die Nut der linken und der rechten Spule gewickelt
verwendete Frequenz:	900 kHz
Aluminiumkern - Meßbereich:	Außendurchmesser: 20 mm; Dicke: 4 mm ± 1 mm
maximaler Ausgangswert:	1,2 V.

B e i s p i e l 7

Beispiel 7 bezieht sich auf den in Fig. 18 dargestellten Differentialtransformator. Die Primärwicklung wurde auf die Böden der beiden Nuten mit einer Breite von 3 mm und einem Bodendurchmesser von 18 mm gewickelt, wobei die Nuten in einer zylindrischen röhrenförmigen Spule aus Kunststoffmaterial vorgesehen waren. Die Sekundärwicklungen wurden direkt über die Primärwicklung gewickelt.

Während einer der Kerne in engem Kontakt an der Spule befestigt war, wurden dadurch Daten erzielt, daß der andere Kern eine Bewegung ausführen durfte, um somit seine Position relativ zur Spule zu verändern. Der sich bewegende Kern muß keine scheibenähnliche Form aufweisen und kann so lange durch einen Teil einer Maschine oder einer Struktur ersetzt werden, solange ein solcher Teil aus derselben Art von Material herge-

- 62 - 66.

steht ist und eine Dicke von mindestens 3 mm aufweist, zur Erzielung der gleichen Ergebnisse..

Primärwicklung:	in zwei Nuten gewickelt, 30 Windungen pro Nut, sowie in 2 Schichten gewickelt
Sekundärwicklungen:	in 60 Windungen in 4 Schichten in jeder der beiden Nuten gewickelt
verwendete Frequenz:	800 kHz
zu verschiebender Aluminiumkern:	Außendurchmesser: 25 mm; Dicke: 4 mm
Meßbereich:	2 mm
maximaler Ausgangswert:	1 V

Vierte Ausführungsform

Die Fig. 20 bis 23 zeigen Differentialtransformatoren als vierte Ausführungsform der Erfindung. Bei dem in Fig. 20 gezeigten Differentialtransformator ist ein Hilfskern an einem Kern befestigt, indem sich dieser durch die Ringöffnung des Kerns hindurch erstreckt und außerdem dem Zweck dient, den Kern zu tragen. Ein modifiziertes Beispiel dieser Anordnung ist - wie in Fig. 23 dargestellt - ausgebildet. Bei dieser Modifikation ist der Kern auf dem Hilfskern verschiebbar. Ersterer ist leichter herstellbar und aufgrund dieser Tatsache in der Praxis besser verwendbar.

Eine Primärwicklung 6 und Sekundärwicklungen 8 und 9 sind auf eine in Fig. 21 dargestellte Spule 1 gewickelt. Die Spule 1 weist eine hohle Durchführung 2 auf. Ein Kern 12 ist innerhalb des Hohlraums 2 der Spule 1 bewegbar. Die Verbindungen der Wicklungen sind in Fig. 22 dargestellt.

Die Spule 1 besteht aus einem Kunststoffmaterial und ist mit zwei Nuten 3 und 4 der gleichen Abmessungen und einem Schlitz 5 versehen, der dazu dient, die Leitungsdrähte in

axialer Richtung der Spule zu führen. Die Primärwicklung 6 ist um die Bodenbereiche der Nuten 3 und 4 in mehreren Schichten sowie durch alle Nuten 3 und 4 fortlaufend gewickelt. Die Sekundärwicklungen sind direkt über die Primärwicklung 6 gewickelt, wobei die eine Sekundärwicklung 8 auf der Seite der Nut 3 und die andere Sekundärwicklung 9 auf der Seite der Nut 4 jeweils in einer bestimmten Anzahl von Windungen gewickelt sind.

Der innerhalb des Hohlraums 2 der Spule bewegbare Kern 12 besteht aus einem leitenden Metallmaterial niedriger Permeabilität und weist eine ringartige Form auf. Ein aus einem ferromagnetischen Material gebildeter Hilfskern 13, der eine stabartige Form aufweist, ragt durch den ringförmigen Hohlraum des Kerns 12 hindurch und ist fest an dem Kern befestigt. Der so angeordnete Hilfskern dient auch zum Tragen des Kerns, wobei der Kern 12 und der Hilfskern 13 miteinander durch den Hohlraum 2 der Spule in axialer Richtung derselben bewegbar sind. Wie bereits erwähnt, muß der Hilfskern 13 länger sein als die gesamte Länge der Primärwicklung 6. Die Primärwicklung 6 weist Leitungsdrähte 7 auf, und die Sekundärwicklungen 8 und 9 weisen Leitungsdrähte 10 und 11 auf. Die Primärwicklung 6 ist so angeordnet, daß eine Wechselstrom-Spannung hoher Frequenz auf beide Enden des Leitungsdrahtes 7 derselben aufträglich ist.

Bei dem wie vorstehend beschrieben ausgebildeten Transformator induzieren die von der Primärwicklung 6 erzeugten magnetischen Kraftlinien Spannungen in den beiden Sekundärwicklungen 8 und 9, die direkt über die Primärwicklung 6 gewickelt sind. Befindet sich der Kern 12 in der Mitte zwischen den Sekundärwicklungen 8 und 9, werden Spannungen gleicher Größenordnung in den beiden Sekundärwicklungen induziert. Dies führt zu einer Spannung von null zwischen den Leitungsdrähten 10 und 11. Bewegt sich der Kern 12 nach links, wie in

bezug auf die Darstellung gemäß Fig. 20 gesehen, wird die in der Sekundärwicklung 8 induzierte Spannung geringer, während die in der anderen Sekundärwicklung 9 induzierte Spannung größer wird. Dann stellt sich zwischen den Leitungsdrähten 10 und 11 eine Spannung ein, die die Differenz zwischen den beiden induzierten Spannungen darstellt. Umgekehrt wird bei Bewegung des Kerns 12 nach rechts die in der Sekundärwicklung 8 induzierte Spannung größer, während die in der Sekundärwicklung 9 induzierte Spannung geringer wird, um somit zwischen den beiden Leitungsdrähten eine Spannung zu erzeugen, die die Differenz zwischen den beiden induzierten Spannungen darstellt. Bei Darstellung der Lageveränderung des Kerns 12 an der Abszisse und der dieser entsprechenden Spannung an der Ordinate läßt sich das Verhältnis der erzeugten Spannung zu der Lageveränderung genau so wie bei herkömmlichen Differentialtransformatoren durch die Form des Buchstabens V darstellen, wie in Fig. 12 gezeigt ist.

Bei dem in Fig. 23 dargestellten Differentialtransformator ist ein Ende der hohlen Durchführung 14 der Spule geschlossen. Dieses geschlossene Ende weist an einem Ende einen daran befestigten Hilfskern 17 auf. Der Hilfskern 17 besteht aus einem ferromagnetischen Material und erstreckt sich von dem geschlossenen Ende der Durchführung 14 in das Innere der Durchführung 14. Ein Kern 15 aus einem leitenden Metallmaterial niedriger Permeabilität ist an einem Ende eines Stützrohrs 16 aus Kunststoffmaterial angebracht und auf dem Hilfskern 17 verschiebbar. Andere Teile dieses Differentialtransformators sind mit entsprechenden Teilen des in Fig. 20 gezeigten Transformators identisch, und für diese werden die gleichen Bezugszeichen verwendet. Mit der Ausnahme, daß der Kern 15 auf dem Hilfskern 17 verschiebbar ist, arbeitet der Differentialtransformator gemäß Fig. 23 in der gleichen Weise wie der in Fig. 20 gezeigte Differentialtransformator.

Wie bereits beschrieben, ist bei den Differentialtransformatoren gemäß der vierten Ausführungsform der Erfindung der Kern ringförmig ausgebildet, wobei dieser aus einem leitenden Metallmaterial geringer Permeabilität besteht und der Hilfskern aus einem ferromagnetischen Material hoher Permeabilität besteht und sich über die gesamte Länge der Primärwicklung erstreckt sowie durch die Ringöffnung des ringförmigen Kerns hindurchragt. Dieser Aufbau garantiert, daß die Verteilungssymmetrie der magnetischen Kraftlinien der Wicklung trotz der Lageveränderung des Kerns beibehalten werden kann, und daß die Verteilung der magnetischen Kraftlinien innerhalb des Hohlraums der Spule durch die Verwindung eines ferromagnetischen Hilfskerns homogen gemacht werden kann. Somit können die Lageveränderung des Kerns und die Ausgangsspannung in einem korrekt proportionalen Verhältnis zueinander gehalten werden. Da weiterhin die magnetische Flußdichte durch den oben erwähnten ferromagnetischen Hilfskern erhöht wird, während zusätzlich die Primärwicklung mit einem Strom hoher Frequenz erregt wird, wird der Wert des in dem Kern entstehenden Wirbelstromverlustes groß. Aus diesem Grund läßt sich somit eine Ausgangsspannung mit einem hohen Wert erzielen. Es ist ein herausragender Vorteil, besonders in bezug auf einen Differentialtransformator mit Wicklungen geringer Breite und geringem Durchmesser, daß erfindungsgemäß ein Niedrigwerden der Ausgangsspannung verhindert werden kann und daß die Linearität angemessen gehalten werden kann.

Zur Veranschaulichung weiterer spezieller Einzelheiten der vierten Ausführungsform werden nachfolgend Beispiele gegeben, wobei zur Bezugnahme auch einige Vergleichsbeispiele genannt sind. Bei jedem der Beispiele wurde ein aus einer Eisenstange hergestellter Hilfskern an einem ringförmigen Aluminiumkern befestigt, indem ersterer durch die ringförmige Durchführung des letzteren hindurchragt.

Bei dem Vergleichsbeispiel wurden ein Aluminiumkern von ringförmiger Gestalt sowie ein Eisenkern von stabförmiger Gestalt verwendet.

Bei den in diesen Beispielen verwendeten Differentialtransformatoren wurden der Innendurchmesser, der Außendurchmesser, die Breite der Nuten sowie der Bodendurchmesser der Nutender Spule, die Anzahl der Windungen, die Anzahl der Windungsschichten und die Windungsbreite der Primärwicklung, die Anzahl der Windungen der Sekundärwicklungen, die Erregerfrequenz sowie das Material, der Außendurchmesser, der Innendurchmesser und die Länge des Kerns verändert.

Die Spule bestand aus Kunststoffmaterial. Der Abstand zwischen den beiden Nuten der Spule betrug 2 mm. Bei jedem Beispiel wurde die Primärwicklung so geschaffen, daß ein Polyurethandrath von 0,10 mm Durchmesser fortlaufend in die beiden Nuten der Spule gewickelt wurde.

Danach wurden die Sekundärwicklungen geschaffen, indem separat Polyurethandrähte mit dem gleichen Durchmesser direkt über die Primärwicklung gewickelt wurden. Die Primärwicklung wurde dann mit einem Wechselstrom von 1 V und Sinuswellenform erregt. Außerdem wurde die verwendete Frequenz auf einen Wert festgesetzt, der die beste Linearität (ca. 1 bis 0,5 % und weniger) ergab.

Es hat sich dann bestätigt, daß die Lageveränderung jedes Kerns im wesentlichen in einem korrekt proportionalen Verhältnis zur Ausgangsspannung lag.

Bei Beispiel 1 war der Wicklungsdurchmesser größer als bei Beispiel 2, und somit führte das zur Verwendung einer niedrigeren Frequenz. Außerdem war bei Beispiel 1 der Durchmesser des Kerns ebenfalls groß und maß 9,8 mm. Demgemäß war bei den im nachstehenden Beispiel beinhalteten Vergleichsbei-

- 67 - 77.

spielen die Ausgangsspannung, die aufgrund des Wirbelstromverlustes unter Verwendung eines Aluminiumkerns erzielt wurde, höher als die Ausgangsspannung, die aufgrund der Permeabilität unter Verwendung eines Eisenkerns erzielt wurde. Bei Beispiel 2 hingegen, in dem der Kerndurchmesser kleiner war und 4 mm betrug, war die unter Verwendung eines Aluminiumkerns erzielte Ausgangsspannung niedriger als die unter Verwendung eines Eisenkerns erzielte Ausgangsspannung. Andererseits war bei Kombinieren eines Aluminiumkerns mit einem Hilfskern aus Eisen gemäß der Erfindung die Ausgangsspannung größer und die Rest-Nullspannung kleiner als bei den Transformatoren, die die vorgenannten Kerne der Vergleichsbeispiele in jedem der Beispiele 1 und 2 verwenden.

B e i s p i e l 1

Spule -	Außendurchmesser: 15 mm; Innendurchmesser: 10 mm; Nutbreite: 3 mm; Bodendurchmesser der Nut: 11 mm
Primärwicklung -	Anzahl der Windungen: 165; Anzahl der Windungsschichten: 4; Windungsbreite: 8 mm
Sekundärwicklungen -	Anzahl der Windungen: 250 (zwei Wicklungen)
verwendete Frequenz:	150 kHz
1) Aluminiumkern -	Außendurchmesser: 9,8 mm; Innendurchmesser: 5 mm; Länge: 5 mm ± 2 mm
Proportionsbereich:	
maximaler Ausgangswert:	1,05 V
Rest-Nullspannung:	nicht über 30 mV
2) Eisenkern -	Außendurchmesser: 9,8 mm runder Stab Länge: 5 mm ± 2 mm
Proportionsbereich:	

- maximaler Ausgangswert: 0,8 V
 Rest-Nullspannung: nicht über 50 mV
- 3) erfindungsgemäßer Kern:
 ringförmiger Aluminiumkern - Außendurchmesser: 9,8 mm;
 Innendurchmesser: 6 mm; Länge: 5 mm
 Hilfskern aus Eisen - Außendurchmesser: 6 mm;
 Innendurchmesser: 3,2 mm;
 Länge: 50 mm
 Proportionsbereich: ± 2 mm
 maximaler Ausgangswert: 1,3 V
 Rest-Nullspannung: nicht über 5 mV.

B e i s p i e l 2

- Spule - Außendurchmesser: 8 mm;
 Innendurchmesser: 4,2 mm;
 Nutbreite: 3 mm;
 Bodendurchmesser der Nut: 5 mm
- Primärwicklung - Anzahl der Windungen: 160; Anzahl
 der Windungsschichten: 4;
 Windungsbreite: 8 mm
- Sekundärwicklungen - Anzahl der Windungen: 224 (zwei
 Wicklungen)
- verwendete Frequenz: 300 kHz
- 1) Aluminiumkern - Außendurchmesser: 4 mm;
 Innendurchmesser: 3 mm; Länge: 5 mm
 Proportionsbereich: ± 2 mm
 maximaler Ausgangswert: 0,65 V
 Rest-Nullspannung: nicht über 35 mV
- 2) Eisenkern - Außendurchmesser: 4 mm
 runder Stab Länge: 5 mm

3127164

- 68 - 73

Proportionsbereich: ± 2 mm
 maximaler Ausgangs-
 wert: 1 V
 Rest-Nullspannung: nicht über 50 mV

3) erfindungsgemäßer Kern:

ringförmiger Aluminium-
 kern -

Außendurchmesser: 4 mm;
 Innendurchmesser: 3 mm; Länge: 5 mm

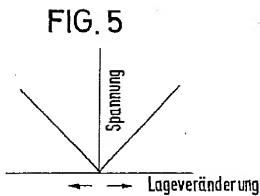
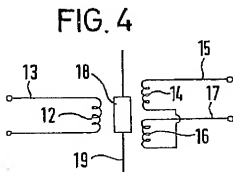
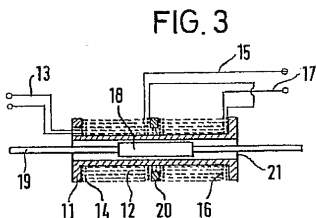
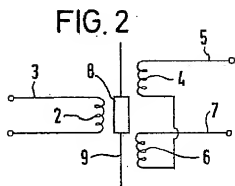
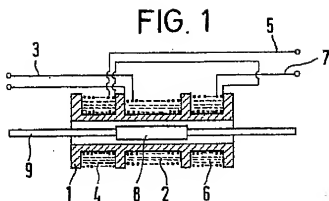
Hilfskern aus Eisen -

Außendurchmesser: 3 mm
 runder Stab Länge: 50 mm

Proportionsbereich: ± 2 mm

maximaler Ausgangs-
 wert: 1,4 V

Rest-Nullspannung: nicht über 10 mV



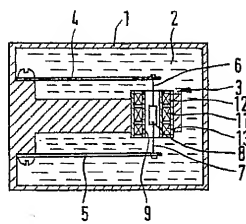


FIG. 6

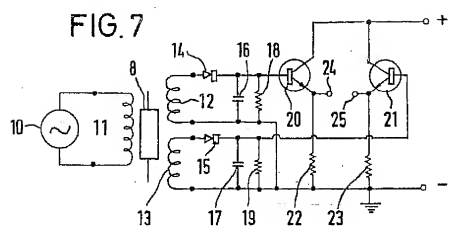


FIG. 7

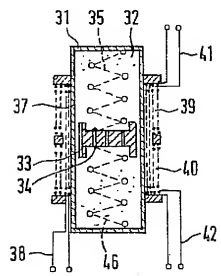


FIG. 8

FIG. 9

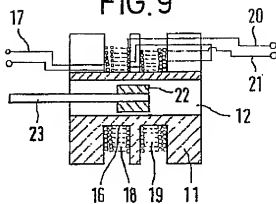


FIG. 10

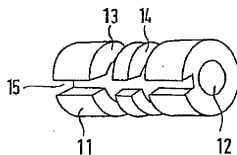


FIG. 11

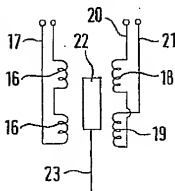


FIG. 12

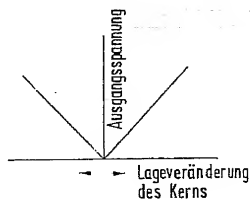


FIG. 13

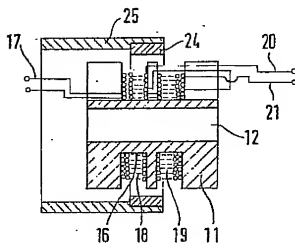


FIG. 14

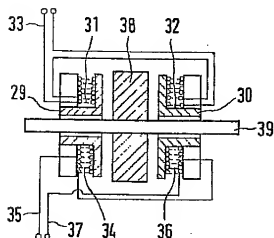


FIG. 15

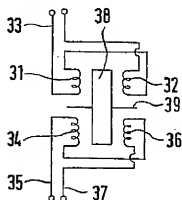


FIG. 16

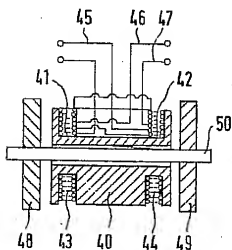


FIG. 17

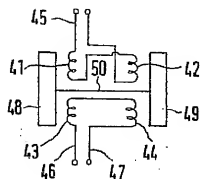


FIG. 18

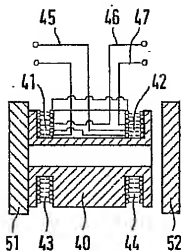


FIG. 20

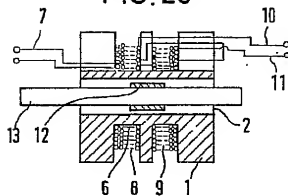


FIG. 19

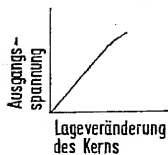


FIG. 21

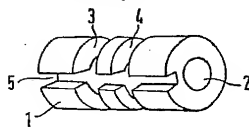


FIG. 22

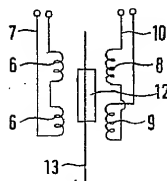


FIG. 23

